

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIERES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
SID-ALI GUERROUMI

ÉLABORATION ET VALIDATION D'UN TEST MESURANT LA
PUISSANCE MAXIMALE AÉROBIE

MAI 1993

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
RÉSUMÉ.....	vi
REMERCIEMENTS	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRES	
I. REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
Bases physiologiques	8
Consommation d'oxygène et exercice.....	15
Facteurs de variation du $\dot{V}O_2$ max	20
Facteurs limitant le $\dot{V}O_2$ max	23
Consommation d'oxygène post-exercice	24
Protocole de mesure du $\dot{V}O_2$ max	28
Épreuve d'évaluation du $\dot{V}O_2$ max sur le terrain	33
Validité d'une épreuve de mesure indirecte du $\dot{V}O_2$ max.....	36
Identification du problème.....	37
Objectif.....	37
II. MÉTHODOLOGIE.....	38
Sujets.....	38
Instruments de mesures.....	38
Protocole expérimental.....	39
Technique expérimentale d'estimation de la puissance aérobie.....	41
Validité du système de mesure	42

III. RÉSULTATS	43
Développement d'une variable prédictive	43
IV. DISCUSSION	51
V. CONCLUSION	54
RÉFÉRENCES	56
ANNEXES	
A. La puissance aérobie étudiée par la mesure du $\dot{V}O_2$ max à deux reprises, à intervalle d'une semaine	63
Données mesurées au test du terrain, en distances parcourues et distances finales avec leurs paramètres respectifs, à savoir le temps de passage et la fréquence cardiaque, en pré-test et en post-test	64
B. Consentement en connaissance de cause à l'épreuve d'effort progressif pour des fins expérimentales pour les sujets participants.	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux

1. Données expérimentales, relatives aux facteurs de la puissance aérobie, enregistrées chez des sujets sédentaires âgés de 20 à 25 ans entraînés et chez des adultes d'endurance (Bergh, 1978). 18
2. Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des sujets 45
3. Coefficients de corrélation pour quelques variables mesurées sur nos 16 sujets..... 46
4. Valeurs individuelles de vitesse moyenne en pré-test (VMav) et en post-test (VMap), de taille et de $\dot{V}O_2$ max, servant à établir la fonction prédictive du $\dot{V}O_2$ max..... 47
5. La puissance aérobie étudiée par la mesure du $\dot{V}O_2$ max à deux reprises, à intervalle d'une semaine..... 63
6. Données mesurées au test du terrain, en distances parcourues et distances finales avec leurs paramètres respectifs, à savoir le temps de passage et la fréquence cardiaque en pré-test et en post-test..... 64

LISTE DES FIGURES

Figures

1. Consommation d'oxygène en fonction de la vitesse de course (Margaria, Edwards et Dill, 1933) 16
2. Catégorie de charges utilisées dans les épreuves d'effort 31
3. Relation entre le $\dot{V}O_2$ max prédit, réalisé à deux reprises sur la piste de 400 m et le $\dot{V}O_2$ max mesuré sur le tapis-roulant 49

RÉSUMÉ

Connaître les exigences d'une spécialité sportive, déterminer le profil physiologique d'un athlète et suivre l'évolution de l'adaptation de ses fonctions, constituent une préoccupation importante de tout physiologiste de l'exercice.

Les athlètes pratiquant des disciplines sportives qui requièrent un effort intense et soutenu pendant plus de 2 minutes possèdent les puissances aérobies les plus élevées. C'est le cas des coureurs de distances supérieures ou égales à 800 m. Inversement, les athlètes pratiquant des disciplines de durées très brèves ou intermittentes, présentent des valeurs de $\dot{V}O_2$ max plus basses que celles de longues durées, mais toujours supérieures à celles des sédentaires.

La consommation maximale d'oxygène aide à prédire la performance chez les athlètes, dans les épreuves intenses et soutenues. Les athlètes qui présentent des valeurs de $\dot{V}O_2$ max très au-dessus de la moyenne, réussissent généralement mieux dans ce type d'épreuves.

L'étude des aspects pratiques du $\dot{V}O_2$ max offre également un intérêt certain. L'utilisation de l'épreuve des 12 minutes de Cooper (1968) a permis de relever certains inconvénients liés, notamment, à sa longue durée.

En vue de réduire la durée de l'épreuve et d'en faciliter l'accès aux hommes de terrain, nous avons élaboré et validé un protocole continu à accroissement progressif de fréquence cardiaque, permettant la mesure du $\dot{V}O_2$ max dans une durée plus courte. Ont pris part à cette étude 16 sujets, âgés de 19 à 28 ans, de sexe masculin, pratiquant régulièrement une activité sportive.

La technique, qui ne nécessite qu'un équipement peu coûteux, est fondée sur l'étroite relation entre la vitesse moyenne et la fréquence cardiaque. Les sujets doivent "courir" sur des phases successives de 2 minutes, selon des valeurs relatives stables de fréquence cardiaque (60, 70, 80, 90%), la valeur cible étant un pourcentage de la fréquence cardiaque maximale théorique (Åstrand, 1960; Margaria, Aghemo et Rovelli, 1965; Maritz, Morrisson, Peter, Strydom et Wyndman, 1961), soit $Fc_{max} = 220 - \text{âge}$.

L'analyse des données après quelques tentatives produit la fonction prédictive suivante, exprimée en $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$:

$$\dot{V}O_2 \text{ max (Préd.)} = 2906.73 - 26.38 (VM) + 0.059 (VM)^2 + 0.4778 (\text{Taille})$$

Les résultats d'expérience, issus d'un échantillon plutôt homogène de 16 sujets adultes mâles, montrent la faisabilité et l'intérêt d'un protocole d'estimation de la puissance aérobie à partir du contrôle de la fréquence cardiaque. La fonction prédictive, une régression multiple avec des composantes du premier et deuxième degrés de la vitesse moyenne de course et une composante de taille, a des similitudes avec celle de Léger et Boucher (1980), elle-même basée plutôt sur le contrôle de la vitesse de course.

Il faudrait bien sûr une expérimentation à plus grande échelle impliquant des échantillons plus diversifiés et une technique d'estimation statistique assise sur de plus nombreux résultats; un jugement sur le mérite métrologique du test proposé ne saurait être formé qu'à ces conditions.

Nous croyons néanmoins avoir indiqué une piste nouvelle, celle de l'effort contrôlé par les paliers de fréquence cardiaque, et avoir présenté des résultats qui confirment les avantages anticipés de cette approche.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à exprimer sa profonde reconnaissance à Monsieur **L. Laurencelle**, co-directeur de ce projet, pour m'avoir fait l'honneur de diriger mon sujet de recherche malgré un emploi du temps extrêmement chargé. Par ses critiques impitoyables et ses fructueux conseils, il a su faire germer en moi la passion du travail bien fait.

L'auteur tient également à remercier Monsieur **D. Méthot**, directeur de ce mémoire, qui a su me donner le support moral et pratique depuis le début de ma scolarité.

La rédaction de ce projet n'a pu se faire sans la précieuse collaboration des sujets. C'est pourquoi je tiens à les remercier.

Monsieur **A. Quirion** a accepté avec empressement d'être un examinateur de ce mémoire, je l'en remercie très sincèrement.

Je ne pourrais oublier l'infinie gentillesse de Mme **L. St Louis**, secrétaire, qui s'est dévouée pour moi plus qu'à mon mérite. Qu'elle trouve ici mes remerciements les plus sincères.

Finalement, je désire exprimer mes sentiments les plus distingués envers ma femme et ma famille, qui ont su me soutenir dans les moments les plus difficiles.

INTRODUCTION

Pendant longtemps, et souvent avec succès, l'entraîneur sportif a adopté une démarche essentiellement empirique, informelle, auprès de ses athlètes. Aujourd'hui, grâce au perfectionnement des techniques et au développement des infrastructures sportives, l'accès aux plus hauts niveaux de performance ne peut être envisagé sans le concours de systèmes et modèles de tout ordre qui contribuent à l'amélioration de la performance.

La détection et la formation du talent, la préparation psychologique du sportif et son insertion socio-professionnelle sont considérées comme les facteurs fondamentaux de la réussite, autour desquels s'organise le contrôle de l'entraînement.

L'amélioration de la performance sportive est actuellement de plus en plus au centre de la pensée et de l'action des spécialistes des sciences du sport. Ces derniers essayent de mettre au point des techniques pour sélectionner et orienter l'athlète, suivre l'évolution de l'adaptation de ses fonctions, conseiller sur la forme et l'intensité du travail, apprécier l'efficacité d'un programme d'entraînement.

Il est bien admis que plusieurs facteurs interviennent dans la réalisation de la performance sportive (Åstrand et Rodahl, 1980; Matveiev, 1983; Weineck, 1983), facteurs parmi lesquels on peut distinguer: 1) l'environnement: comprenant les facteurs socio-culturels, le climat, et l'altitude, 2) les facteurs psychologiques: la motivation, l'intelligence, 3) les facteurs héréditaires: taille, poids, sexe, composition des fibres musculaires.

Outre ces différents facteurs, une préparation physique, technique et tactique appropriée de l'athlète permet de gérer et de développer au mieux ses potentialités.

Ce qui n'était, il y a une vingtaine d'années à peine, qu'une simple curiosité intellectuelle de scientifiques, a acquis aujourd'hui le statut de spécialités internationalement reconnues: la médecine du sport, la psychologie du sport, la biochimie de l'effort, la sociologie du sport, la physiologie de l'effort, etc.

Les sciences appliquées au sport permettent ainsi de connaître de mieux en mieux l'homme en mouvement, elles contribuent à l'orientation, à la sélection et à l'évaluation sportives, de même qu'elles permettent une préparation de l'athlète planifiée, adaptée et contrôlée.

L'élévation du niveau de performance, les limites de l'entraînement empirique et les données scientifiques ont donné jour à des méthodes d'entraînement fondées sur des principes rigoureux, que nous présentons brièvement ci-après, permettant à l'athlète de gérer et de développer au mieux son potentiel.

Le principal objectif de l'entraînement est d'amener, entre autres, une adaptation biologique telle que la performance soit améliorée. L'entraînement physique soumet l'organisme à une succession de charges d'intensité, de durée et de fréquence suffisantes pour déterminer un effet mesurable, c'est-à-dire une amélioration des possibilités fonctionnelles du sujet.

Ce principe a donné lieu, durant ces deux dernières décennies, à une augmentation considérable de la charge d'entraînement et des facteurs qui la sous-tendent. Les entraînements des athlètes d'élite ont augmenté en nombre ainsi qu'en intensité dans toutes les disciplines sportives. Leur fréquence atteint parfois 12 séances par semaine,

totalisant un volume annuel de plus de 1000 heures. Actuellement la charge des entraînements a atteint un niveau tel qu'on ne peut plus espérer beaucoup de l'augmentation de volume horaire annuel d'entraînement ni de sa fréquence. C'est plutôt dans l'amélioration de l'efficacité du travail qu'il faut chercher les possibilités d'une nouvelle évolution de la performance. Ceci sous-entend l'application de principes d'entraînement et d'évaluation, adaptés à chacune des catégories de disciplines sportives, en sélectionnant le talent sportif à partir de critères pertinents, en privilégiant le développement des qualités déterminantes de la spécialité, faisant des autres des qualités d'appoint, en contrôlant périodiquement l'efficacité des programmes d'entraînement utilisés, par la mesure de leur impact sur les qualités visées, en affinant sans cesse l'organisation interne des différentes étapes d'entraînement, en fonction des exigences de la discipline, des caractéristiques physiologiques, entre autres, des athlètes, de leur niveau de progression et des objectifs recherchés.

La spécificité de l'entraînement prenant de plus en plus d'importance, l'identification des exigences requises pour la pratique de chaque sport s'avère nécessaire.

Chaque programme d'entraînement doit consacrer une part importante au développement des qualités sollicitées par la discipline sportive pratiquée. Plus l'entraînement est ciblé sur les groupes musculaires sollicités, tenant compte des exigences de la compétition, meilleurs seront les résultats selon Brooks et Fahey (1984). Un exercice spécifique suscite, entre autres, des adaptations métaboliques et physiologiques spécifiques et entraîne des améliorations spécifiques (Mc Ardle et Katch, 1987).

Par ailleurs, pour maintenir l'efficacité de la préparation physique et favoriser une continuelle amélioration chez un athlète, il est nécessaire d'élever le niveau de l'exercice

au fur et à mesure de l'amélioration de sa performance, en agissant sur la fréquence, l'intensité ou la durée des séances d'entraînement (*principe de la surcharge*).

La réponse de l'organisme à cette *surcharge* revêt un caractère individuel. Un régime d'entraînement imposé à un groupe d'athlètes peut ne pas s'accompagner des mêmes bénéfices pour tous, c'est le principe de l'individualisation de l'entraînement. Ceci suggère que les bénéfices de l'entraînement seraient optimaux pour un sujet donné lorsque les charges d'entraînement sont prescrites en fonction des exigences de sa spécialité, tenant compte de ses caractéristiques propres.

La mise en évidence de la nature des modifications physiologiques à l'effort, l'identification des exigences liées à la pratique sportive, la connaissance des caractéristiques physiologiques de l'athlète ainsi que leur intégration dans la préparation sportive, semblent constituer, de nos jours, un gage d'une meilleure prise en charge méthodologique de l'athlète et par conséquent, une chance supplémentaire de succès.

En outre, en raison de la sévérité des programmes d'entraînement, liée à leur intensité et leur fréquence, et compte tenu des modifications fonctionnelles et structurelles qu'ils sont susceptibles de provoquer chez l'athlète, une surveillance physiologique régulière du sportif, réalisée à des moments opportuns, s'avère importante à la fois pour préserver sa santé, pour évaluer sa progression et pour réajuster, le cas échéant, ses charges d'entraînement en fonction de son potentiel et du niveau de performance qu'il souhaite atteindre.

La puissance aérobie d'un athlète exprime son aptitude à effectuer des efforts intenses et soutenus, elle est définie par la puissance d'adaptation d'un ensemble de processus physiologiques chargés de capter, de transporter, puis de livrer l'oxygène aux

muscles en activité. Un indice intégral de ces processus est représenté par la consommation maximale d'oxygène ou volume d'oxygène ($\dot{V}O_2\text{max}$).

Parmi les méthodes de mesure utilisées, la méthode directe, à partir des gaz expirés durant un effort progressif maximal, constitue la méthode de référence, mais elle exige un personnel et un équipement spécialisés et la participation de sujets très motivés.

Si la puissance aérobie ne pose pas de difficulté théorique particulière et que sa mesure généralement admise est le $\dot{V}O_2\text{ max}$ il resterait à préciser son influence sur la performance sportive d'une manière générale, et sur celle des sports de longue durée, en particulier. Il serait également utile de vérifier si la seule mesure du $\dot{V}O_2\text{ max}$ suffit à apprécier la puissance d'endurance.

En ce qui concerne la mesure du $\dot{V}O_2\text{ max}$, la difficulté provient, non des techniques disponibles (méthodes directes), mais au contraire de leur multiplicité et de la diversité des protocoles rencontrés, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Cependant, autant les techniques pour évaluer la puissance aérobie sont nombreuses et conceptuellement claires, autant il semble ardu d'avoir une mesure opérationnelle du niveau de développement de la puissance anaérobie (Criellard et Pirnay, 1985; Vandewalle, Peres et Monod, 1987). Nous nous bornerons ici à la puissance aérobie, en posant la question suivante: Serait-il possible, à partir des données théoriques existantes, d'identifier les techniques de mesure accessibles, ayant une précision et une validité satisfaisantes?

Que l'on souhaite enregistrer les réactions circulo-respiratoires à l'effort, ou que l'on doive mesurer la puissance aérobie, les exigences des méthodes et des techniques impliquées sont telles que, quelle que soit l'approche choisie, celle-ci implique des

répercussions financières pour l'équipement et les fournitures et pose un problème de qualification du personnel chargé de leur mise en application. De telles explorations sont inaccessibles à un grand nombre de laboratoires et particulièrement ceux disposant de faibles ressources. Aussi, des techniques moins condensées, mais de validité et fiabilité satisfaisantes, moins contraignantes pour l'athlète et ne nécessitant pas une importante qualification de la part des examinateurs, mériteraient d'être mises au point.

En outre, les données physiologiques pouvant servir également aux "hommes de terrain", des techniques simples, accessibles, d'interprétation facile et à intérêt pratique immédiat, devraient être mises à leur portée. D'un point de vue pratique, l'objectif de cette étude est de proposer une technique et des critères permettant d'améliorer le contrôle de l'entraînement, afin d'apprécier le niveau d'aptitude des participants et suivre leur progression.

Ce but est traduit en termes des objectifs généraux suivants: identifier les techniques d'évaluation de la puissance aérobie, élaborer et valider un nouveau test de courte durée basé sur une course à régime cardiaque progressif et contrôlé estimant la consommation maximale d'oxygène en confrontant les résultats obtenus par méthodes directe et indirecte sur un groupe de sujets sportifs moyennement entraînés.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La présente étude s'inscrit dans le courant des recherches sur la mesure des puissances physiques des athlètes et l'entraînement. La revue de la littérature portera en premier lieu sur un rappel physiologique. Les réactions physiologiques y sont décrites chez l'homme sédentaire sain et chez l'athlète, aussi bien à l'état de repos qu'à l'exercice. Deuxièmement, on verra l'évolution de différents paramètres physiologiques au cours de l'exercice et leur comportement à l'effort maximal sera présenté aussi bien d'un point de vue descriptif qu'analytique. Les limites des adaptations physiologiques de l'athlète sont décrites en fonction du type d'effort accompli et de sa spécialité. Troisièmement, l'élaboration de la qualité qui intéresse notre étude à la performance sera décrite, en même temps que la pertinence de son évaluation. On envisagera aussi l'intégration de la mesure de cette qualité dans le cadre de la préparation sportive, du contrôle de l'entraînement et de la surveillance physiologique de l'athlète. Quatrièmement, les techniques d'évaluation les plus répandues de la puissance aérobie seront étudiées et leurs limites définies. De nouvelles propositions sont apportées en vue de les adapter à des conditions empiriques particulières ou à des ressources plus modestes.

Partant d'une conception où les systèmes circulo-respiratoires constituaient les éléments centraux de l'évaluation physiologique, les progrès réalisés, surtout durant les 20 dernières années, recentrent le problème sur le fonctionnement de la fibre musculaire et sur les adaptations requises par le maintien de son activité au cours de l'exercice. Dans cette perspective, ventilation et circulation ne constituent que les premières étapes d'un

cycle dans lequel l'énergie est puisée dans le milieu externe, transformée et mise en réserve dans l'organisme, ou bien transportée jusqu'aux tissus actifs et notamment aux muscles et, par l'intermédiaire du système ostéo-articulaire, au milieu extérieur sous forme de mouvements simples, d'actions ou de conduites motrices.

Bases physiologiques

Ventilation pulmonaire

La ventilation pulmonaire constitue le mouvement global qui assure le déplacement des gaz respiratoires de l'extérieur vers l'intérieur des poumons et inversement. La quantité de gaz transporté dépend essentiellement du débit ventilatoire, lequel est sous l'influence conjointe de la fréquence respiratoire et du volume courant. Par définition, la ventilation pulmonaire est égale au produit de la fréquence respiratoire par le volume courant. Par définition, la ventilation pulmonaire est égale au produit de la fréquence respiratoire par le volume courant.

Au repos, la fréquence respiratoire est d'environ 12 cycles par minute (c/minute), et le volume courant de 500 ml en moyenne par cycle. Dans ces conditions, le volume d'air respiré par minute ou débit ventilatoire est de 6 l/minute.

Une augmentation de la fréquence respiratoire (FR) ou du volume courant (VC), ou des deux, entraîne une augmentation substantielle du débit respiratoire. Au cours d'une épreuve maximale, le débit ventilatoire peut dépasser 200 l/minute chez des sportifs bien entraînés, soit près de 30 fois la valeur de repos. Cette augmentation de la \dot{V}_E est due à une élévation simultanée de la fréquence respiratoire (qui passe de 8-12 à

50-60 c/minutes), et à une augmentation de la quantité d'air mobilisée par chaque mouvement (qui passe de 0.5 à 3.5 l).

Lors d'un exercice à intensité modérée, le volume courant croît plus vite que la fréquence respiratoire, en fonction de la charge. Le volume courant (VC) augmente en empiétant sur les volumes de réserve inspiratoire et expiratoire. L'inspiration et l'expiration deviennent comparables par leur durée et leur déroulement. La puissance vitale représente la limite supérieure du volume courant, mais celui-ci dépasse rarement 50 à 60 % de cette puissance.

À partir d'une certaine charge, le VC plafonne et l'accroissement de la \dot{V}_E s'effectue presque exclusivement avec la fréquence respiratoire; le volume courant trouve sa limite quand il atteint 50 à 60% de la puissance vitale des sujets entraînés ou non (Folinsbee, 1983; Mc Ardle et Katch, 1987).

Variation de la ventilation au cours de l'exercice

Au cours d'un exercice, de grandes quantités d'oxygène alvéolaire diffusent des poumons vers le sang veineux. En retour, une quantité à peu près équivalente de gaz carbonique diffuse du sang veineux vers les alvéoles. En contrepartie, le débit ventilatoire s'élève afin de maintenir constantes les concentrations des gaz alvéolaires et assurer les échanges gazeux.

Au cours d'un exercice à charge progressivement croissante, le débit ventilatoire croît d'une manière exponentielle en fonction de la charge de l'exercice et en fonction de la consommation d'oxygène.

Pour des charges modérées, la $\dot{V}E$ augmente proportionnellement au $\dot{V}O_2$ et au $\dot{V}CO_2$. Pour ces charges, la $\dot{V}E$ augmente principalement par augmentation du volume courant. À charges plus importantes, la fréquence respiratoire joue un rôle plus important, le volume courant ayant atteint sa limite normale. Grâce à cet ajustement ventilatoire, l'aération du sang est complète car le PO_2 et la PCO_2 alvéolaires conservent pratiquement les mêmes niveaux qu'au repos (Grimby, 1969).

Le rapport du débit ventilatoire et de la consommation d'oxygène correspond à l'équivalent respiratoire. Chez l'adulte sain, l'équivalent respiratoire est d'environ 25 litres d'air par litre d' O_2 consommé au cours d'un exercice à intensité modérée. À des niveaux d'exercices plus intenses, la $\dot{V}E$ augmente d'une façon disproportionnée par rapport au $\dot{V}O_2$. Par conséquent, l'équivalent respiratoire peut atteindre 35 à 40 litres d'air par litre d'oxygène consommé.

Influence de l'entraînement sur la fonction pulmonaire

Bien que certaines mesures de la fonction pulmonaire constituent de bons indices de l'ampleur d'une obstruction pulmonaire et s'améliorent avec l'entraînement, chez les malades comme chez les individus en bonne santé (Robinson et KJeldard, 1982), elles constituent de piètres indices de performance ou d'aptitude physique lorsqu'elles sont situées dans les limites de la normalité. En effet, des sujets non entraînés, en bonne santé, présentent la même puissance vitale moyenne que des sujets entraînés (Sady, 1984). De même, les volumes et débits ventilatoires des athlètes ne diffèrent pas de ceux d'individus témoins aux caractéristiques anthropométriques comparables (Mahler, 1982).

Après normalisation des valeurs de volumes pulmonaires selon les caractéristiques morphologiques, on n'observe aucune relation entre la fonction pulmonaire et les résultats de tests physiques (McArdle et Katch, 1987).

Bien qu'on relie souvent les sensations de fatigue d'un effort vigoureux aux sensations *d'essoufflement*, il semble que la puissance ventilatoire ne soit pas un facteur limitatif de la performance physique. Les volumes et débits pulmonaires plus importants de quelques athlètes pourraient traduire le renforcement des muscles respiratoires par un entraînement spécifique, ils sont aussi attribués à des facteurs génétiques (Grimby, 1969).

L'entraînement physique provoque différentes adaptations ventilatoires:

- il réduit la ventilation pour une même charge submaximale, entraînant une réduction du coût énergétique de la respiration,
- il augmente la ventilation maximale, et
- il améliore l'endurance des muscles respiratoires par augmentation de la concentration des enzymes oxydatives (Moore et Gollnick, 1982).

Si l'entraînement augmente la ventilation maximale, en revanche, celle-ci n'est pas corrélée à l'aptitude physique. Bien que l'influence de ces adaptations sur la performance physique ne soit pas évidente, il semble que la réduction de la ventilation au cours d'un exercice sous-maximal et l'amélioration de l'endurance des muscles respiratoires retarderaient l'installation de la fatigue lors de l'effort musculaire (Bye, 1984). En effet, la fatigue respiratoire reliée aux sensations d'essoufflement semble être attribuée à la

concentration locale d'acide lactique particulièrement élevée chez des sujets sédentaires (Martin, 1984).

Débit cardiaque

Le débit cardiaque est le premier indicateur de la puissance du système cardio-vasculaire à satisfaire les besoins de l'organisme à l'effort. Le débit cardiaque est déterminé par la fréquence cardiaque (FC) et par la quantité de sang éjectée à chaque battement cardiaque [volume d'éjection systolique (VS)], suivant la relation:

$$Q_c = FC \times VS$$

Au repos, le débit cardiaque (Qc) est d'environ 6 l/minute; il varie cependant beaucoup au repos, il est influencé par l'état émotionnel du sujet, état que médiatisent les nerfs cardio-accélérateurs et vasomoteurs.

Le débit cardiaque augmente proportionnellement à la consommation d'oxygène et donc à l'intensité de l'exercice. Il existe une étroite relation entre les valeurs maximales du débit cardiaque et de la consommation d'oxygène. Plus le débit cardiaque maximal est élevé, plus la consommation maximale d'oxygène est importante. Chez les sportifs de haut niveau, le débit cardiaque peut atteindre 40 l/minute environ, au cours de l'exercice maximal contre 20 l/minute environ chez le sujet sédentaire, pour une même fréquence cardiaque maximale. Cette différence entre athlètes et sédentaires est liée exclusivement à leur différence de volume d'éjection systolique (VS)

Volume d'éjection systolique (VS)

La valeur du VS au repos se situe entre 70 et 90 ml par battement cardiaque chez le sujet sédentaire. Les valeurs maximales varient d'un individu à l'autre et sont comprises

entre 100 et 120 ml. Chez le sujet entraîné, le VS au repos est d'environ 100 à 120 ml et peut atteindre 200 ml par battement lors de l'effort maximal.

L'augmentation du VS résulte d'une augmentation de la force de contraction du myocarde, laquelle est sous la dépendance de facteurs nerveux et hormonaux.

Au repos 50% du volume télédiastolique total est éjecté à chaque contraction ventriculaire. Une contraction plus puissante peut augmenter le VS en vidant plus complètement les ventricules, sans augmentation préalable du volume télédiastolique (Fox et Mathews, 1984).

Fréquence cardiaque (FC)

La FC est également sous le contrôle des influences nerveuses et hormonales qui déterminent le volume d'éjection systolique. Elle augmente de façon linéaire chez les sujets entraînés ou non, au fur et à mesure de l'augmentation de la consommation d'oxygène ou de la charge de travail. Toutefois, dans certains cas, cette relation peut changer avant que les valeurs maximales ne soient atteintes. Ceci est lié au fait que le volume d'éjection systolique atteint sa valeur maximale lors d'une charge sous-maximale (40 à 50% du $\dot{V}O_2$ max). À partir de cette charge, la fréquence cardiaque constitue le seul facteur responsable de l'augmentation du débit cardiaque.

La fréquence cardiaque maximale varie de façon importante d'un sujet à l'autre. Elle diminue généralement avec l'âge du sujet.

L'entraînement en endurance a un effet très prononcé sur la fréquence cardiaque. Il augmente la sensibilité du nœud sinusal à l'acétylcholine, dont l'effet est de ralentir la fréquence cardiaque. Cet effet est probablement doublé d'une réduction de l'activité

sympathique au repos. Cette adaptation par l'entraînement explique en partie la bradycardie de repos chez l'athlète qui est de l'ordre de 40 à 50 batt/min. On ne sait pas encore précisément si c'est la bradycardie qui entraîne l'augmentation du volume d'éjection systolique ou si c'est l'inverse. En effet, l'entraînement de type endurance renforce le myocarde, le rendant capable d'une plus forte éjection systolique, de même qu'il augmente le tonus vagal provoquant un ralentissement de la fréquence cardiaque.

Débit cardiaque au cours de l'exercice

Lors du passage du repos à l'exercice, l'augmentation du débit cardiaque est due à une augmentation simultanée du volume d'éjection systolique et de la fréquence cardiaque.

Lors d'un exercice à charge croissante, le volume d'éjection systolique n'augmente plus lorsque la consommation d'oxygène atteint 40 à 50% de sa valeur maximale chez tous les sujets normaux, qu'ils soient sédentaires ou entraînés. Toute nouvelle augmentation du débit cardiaque est uniquement liée à l'augmentation de la fréquence cardiaque. La fréquence cardiaque évolue alors linéairement avec le $\dot{V}O_2$, ou avec la charge développée.

L'entraînement augmente le débit cardiaque. La plus grande partie de cette amélioration provient de l'augmentation du volume d'éjection systolique. L'entraînement ralentit la fréquence cardiaque au repos et à l'exercice, de même qu'il réduit la fréquence cardiaque maximale, en particulier dans les sports d'endurance.

Consommation d'oxygène et exercice

Définition de la consommation d'oxygène. La consommation d'oxygène proprement dite comprend les réactions biochimiques qui, au sein des mitochondries, auront pour résultat final de produire de l'énergie avec formation d'eau et de CO_2 .

Nous avons vu que la production d'énergie à partir de ce processus aérobie implique la dégradation d'un combustible dans la cellule musculaire en présence d'oxygène et que le combustible peut provenir de l'intérieur du muscle (triacylglycérols) et de l'extérieur du muscle (acides gras du tissu adipeux, glycogène hépatique). Pour que ce métabolisme contribue d'une manière significative à la production d'énergie, l'oxygène doit être fournie aux mitochondries des fibres musculaires en quantité suffisante.

Au repos, l'organisme consomme globalement environ 250 ml d'oxygène par minute, la consommation d'oxygène musculaire en représente 20 à 25% . Lors d'une épreuve musculaire à charges progressives, la consommation d'oxygène croît d'une manière linéaire avec la charge de travail et atteint des valeurs 8 à 25 fois supérieures à la valeur de repos. La consommation d'oxygène au niveau musculaire atteint des valeurs 100 fois supérieures à ce qu'elle est au repos. De tels accroissements du $\dot{V}\text{O}_2$ sont rendus possibles grâce à l'accroissement simultané du débit cardiaque et de la différence artério-veineuse pour l'oxygène et grâce à la redistribution des circulations locales.

L'allure de la pente d'accroissement du $\dot{V}\text{O}_2$, en fonction de la charge est indépendante de l'âge, du sexe et du niveau de pratique sportive. Pour une même charge constante, la consommation d'oxygène varie peu d'un sujet à un autre; les sujets se distinguent entre eux, par contre, par leur niveau maximum de consommation d'oxygène qui est atteint généralement en fin d'une épreuve maximale.

Définition de la consommation maximale d'oxygène. La consommation maximale d'oxygène correspond au taux maximal de libération d'énergie obtenu exclusivement à partir du processus oxydatif. Lors d'une épreuve maximale à charge progressive, le $\dot{V}O_2$ max correspond à la valeur à partir de laquelle la consommation d'oxygène se stabilise malgré toute nouvelle augmentation de la charge et où l'énergie requise additionnelle doit provenir des sources anaérobies (Figure 1).

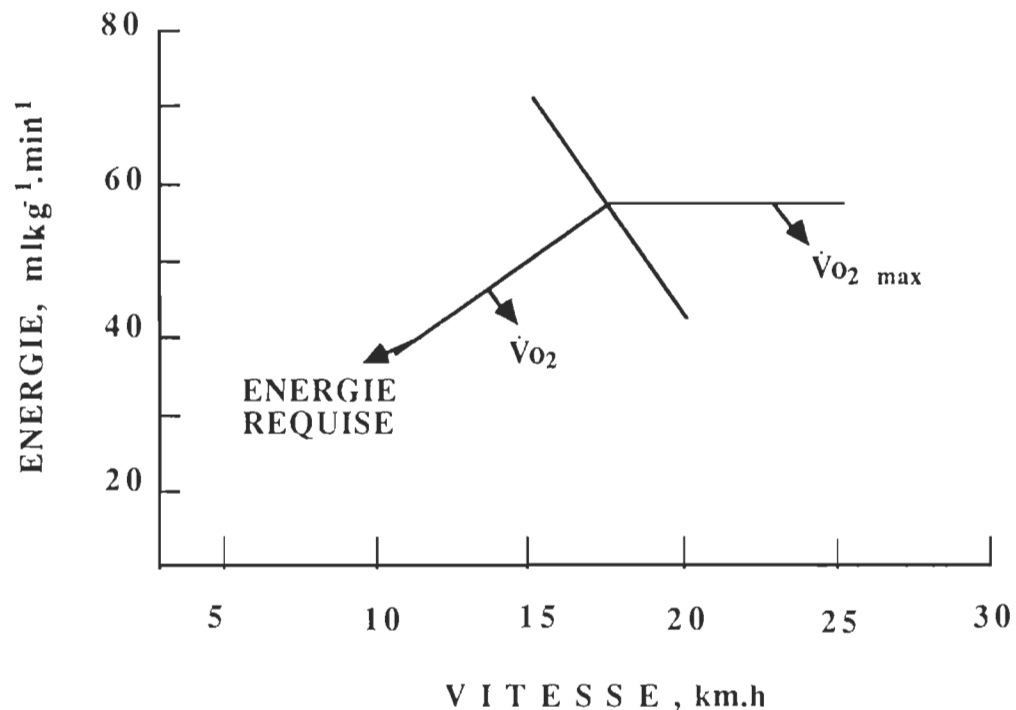


Figure 1. Consommation d'oxygène en fonction de la vitesse de course (Margaria, Edwards et Dill, 1933).

La consommation d'oxygène augmente jusqu'à ce que l'organisme atteigne ses limites, c'est-à-dire à $50 \text{ ml.kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ou $14 \text{ km} \cdot \text{h}$ pour l'individu-type représenté à la Figure 1. Au-delà de $14 \text{ km} \cdot \text{h}$, l'énergie requise additionnelle provient des sources anaérobies.

La consommation maximale d'oxygène d'un individu correspond au volume (\dot{V}) par minute (point sur le \dot{V}) d'oxygène (O_2) qu'il consomme lors d'une épreuve maximale et soutenue (max): $\dot{V}O_2 \text{ max}$.

Les sujets entraînés se distinguent des sédentaires par le fait que leur $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est significativement plus élevé. Les valeurs importantes du $\dot{V}O_2 \text{ max}$ enregistrées chez les athlètes sont attribuées à leur volume d'éjection systolique (et donc leur débit cardiaque) et leur différence artério-veineuse pour l'oxygène nettement plus élevés (Tableau 1).

Tableau 1

Données expérimentales, relatives aux facteurs de la puissance aérobie, enregistrées chez des sujets sédentaires âgés de 20 à 25 ans entraînés et chez des athlètes d'endurance (Bergh, 1978)

Facteurs	Sédentaire*		Athlètes d'endurance
	Avant	Après	
Consommation maximale d'oxygène (L·mn)	3.1	3.6	5.6
Consommation maximale d'oxygène (ml·kg ⁻¹ ·mn ⁻¹)	42	49	75
Différence artério-veineuse pour l'oxygène (ml·l)	144	155	156
Débit cardiaque (L·mn ⁻¹)	21.5	23.2	36.0
Fréquence cardiaque (batt/min ⁻¹)	196	192	190
Volume systolique (ml)	110	122	189

*2-4 mois d'entraînement.

Mécanismes de l'augmentation du $\dot{V}O_2$

L'organisme dispose de deux moyens pour augmenter sa consommation d'oxygène. Le premier est d'accroître la vitesse de la circulation sanguine (le débit cardiaque), le deuxième est de mieux utiliser l'oxygène transporté en assez grande quantité par le sang (différence artério-veineuse pour l'O₂).

Le débit cardiaque (Qc) et la différence artério-veineuse (a - $\dot{V}O_2$) pour l'oxygène s'ajustent, en effet, lors de l'exercice pour assurer un apport d'oxygène suffisant aux

muscles actifs. La *relation Fick* présentée ci-dessous exprime la relation existant entre la consommation d'oxygène et les différents facteurs de son transport (à l'exception de la ventilation pulmonaire):

$$\dot{V}O_2 = Fc \times VS \times (a - \dot{V}O_2)$$

Le $\dot{V}O_2$ max d'un sujet et donc sa puissance aérobie maximale, dépendent de l'efficacité de son système de transport de l'oxygène et de la puissance de ses muscles à utiliser l'oxygène qui lui est livré.

Le Tableau 1, présenté à titre d'exemple, fournit les facteurs définissant la consommation d'oxygène, ce pour des sujets relativement sédentaires et pour des athlètes d'endurance de haut niveau.

Les résultats présentés au Tableau 1 montrent qu'un programme d'entraînement intense d'une durée de 2 à 4 mois améliore la consommation maximale d'oxygène de plus de 16 % et que la valeur enregistrée chez des sportifs pratiquant des sports d'endurance est près de deux fois plus élevée que celle du sédentaire (Bergh, 1978).

D'après les données présentées dans ce tableau, une amélioration de 16 % du $\dot{V}O_2$ max est accompagnée d'une amélioration du débit cardiaque de 8%, du volume d'éjection systolique de 11%, et de la différence artério-veineuse pour l'oxygène de 8% . La plus grande amélioration du $\dot{V}O_2$ max provient de l'augmentation du volume d'éjection systolique.

L'amélioration du débit cardiaque est elle-même liée à l'augmentation du volume d'éjection systolique.

La différence artério-veineuse augmente légèrement avec l'entraînement. Cette amélioration de la puissance d'extraction de l'oxygène est liée à une amélioration de la microcirculation (Saltin, Henriksson, Nygaard, Andersen et Jansson, 1977) par augmentation de la densité capillaire, offrant une plus grande surface d'échanges de nutriments et de gaz métaboliques au cours de l'exercice, et à une amélioration de la puissance métabolique des fibres musculaires impliquées. Les mitochondries augmentent en taille et même en nombre, de même que la quantité d'enzymes oxydatives s'accroît.

Si l'on compare la différence artério-veineuse pour l'O₂ des sujets entraînés par rapport aux athlètes d'endurance ayant de nombreuses années d'entraînement, on constate des valeurs équivalentes. La différence de $\dot{V}O_2$ max entre ces deux populations est donc essentiellement liée à leur différence de volume d'éjection systolique et donc à leur débit cardiaque.

Facteurs de variation du $\dot{V}O_2$ max

La consommation maximale d'oxygène est influencée par de nombreux facteurs. Les plus importants sont le type d'épreuve, les caractères héréditaires, le niveau et le type de pratique sportive, l'âge, le sexe et la composition corporelle, et la composition des fibres musculaires.

Type d'épreuves. On admet généralement que les variations de $\dot{V}O_2$ max observées dépendent de la masse musculaire mise en jeu ainsi que du type de l'épreuve maximale réalisée. Le $\dot{V}O_2$ max peut, en effet, varier chez un même sujet au cours de différents types d'exercice en fonction de la masse musculaire mise en jeu et des modalités de l'épreuve utilisée. C'est à la course sur un tapis roulant qu'on obtient généralement les valeurs de $\dot{V}O_2$ max les plus élevées.

Hérédité. On s'interroge souvent sur l'importance de l'hérédité dans le fonctionnement de l'organisme et de son influence sur la performance physique. Jusqu'à quel point une puissance aérobie exceptionnellement élevée des athlètes d'endurance est-elle déterminée par l'hérédité? De toute évidence, un tel niveau de développement de la puissance fonctionnelle n'est pas le seul résultat de l'entraînement.

Les données présentement disponibles sur cette question suggèrent qu'il existe dans la race humaine une grande étendue de variations génétiques tant au niveau des gènes que des séquences d'ADN non-codant. Ces variations apparaissent plus fréquemment dans les séquences d'ADN non-codant que dans les exons codants.

Bien que ceci n'influence pas directement la structure primaire des protéines, les conséquences de ces variations sur l'expression génétique peuvent être importantes. À la lumière des évidences actuellement disponibles, il est impossible de conclure avec certitude quant à l'importance des minces différences raciales observées dans les variations génétiques et à leurs impacts sur la performance sportive. Il se peut que cette faible hétérogénéité génétique inter-raciale ait des implications importantes sur la performance sportive (Bouchard, 1988).

Niveau de pratique sportive. La valeur du $\dot{V}O_2$ max dépend largement du niveau d'entraînement des sujets au moment de l'évaluation. Les améliorations du $\dot{V}O_2$ max avec l'entraînement varient généralement entre 6 et 20%, chez les sujets entraînés elles peuvent atteindre exceptionnellement 40%.

La valeur du $\dot{V}O_2$ max dépend également du type de pratique sportive. Habituellement, les athlètes de haut niveau, dans les disciplines sportives qui requièrent

un effort soutenu de plus de 2 minutes, présentent un $\dot{V}O_2$ max plus élevé que ceux qui pratiquent un sport nécessitant un effort plus bref ou plus intermittent.

Sexe. Le $\dot{V}O_2$ max des hommes est normalement de 15 à 30% plus élevé que celui des femmes. Les différences sont plus grandes si le $\dot{V}O_2$ max est rapporté en valeur absolue (l/min) plutôt qu'en valeur relative à la masse corporelle ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$). Cette différence est généralement attribuée à des différences de:

- constitution corporelle: l'homme peut produire plus d'énergie en aérobie parce que, contrairement à la femme, sa masse musculaire est plus importante;
- du taux d'hémoglobine dans le sang: sans qu'on sache exactement pourquoi, la concentration d'hémoglobine est de 10 à 14% plus élevée chez les hommes. Cette différence de puissance de transport sanguin d'oxygène avantage légèrement la puissance aérobie de l'homme.

Même si une importante musculature et une plus forte concentration d'hémoglobine avantagent l'homme en termes de puissance aérobie, cela n'explique pas totalement les différences observées entre les deux sexes. Il est probable que ces différences sont liées aux différences entre les activités normales de l'homme et de la femme (Mc Ardle et Katch, 1987).

Composition corporelle: Wyndham, Strydom, et Van Rensburg (1969) estiment qu'une part importante des différences interindividuelles du $\dot{V}O_2$ max dépend des différences de masse corporelle. C'est pour cette raison essentiellement que le $\dot{V}O_2$ max s'exprime généralement en termes relatifs à la masse corporelle.

Le $\dot{V}O_2$ max est également affecté par l'âge. Le $\dot{V}O_2$ max ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) s'élève rapidement au cours de la croissance et atteint sa valeur maximale entre 18 et 25 ans.

Cette amélioration apparente avec l'âge s'estompe lorsque le $\dot{V}O_2$ max est rapporté à la masse corporelle. Au delà de 25 ans, le $\dot{V}O_2$ max diminue régulièrement, cette diminution peut atteindre 27% à l'âge de 55 ans (Åstrand et Rodahl, 1980).

Facteurs limitant le $\dot{V}O_2$ max

Le débit maximum d'énergie qui peut être fourni par les processus oxydatifs est sous la dépendance de deux facteurs:

- la puissance combinée des mécanismes pulmonaire, cardiaque, sanguin, vasculaire et cellulaire de capter, transporter, puis de livrer aux muscles actifs l'oxygène nécessaire au travail (composante centrale);
- la possibilité chimique des fibres musculaires actives d'utiliser l'oxygène pour la dégradation des combustibles cellulaires (composante périphérique).

On ne sait pas encore laquelle des deux composantes est la plus limitative ou la plus entraînable. Bien qu'il soit possible d'isoler expérimentalement chacune de ces composantes, les mesures habituelles de la fonction aérobie considèrent le transport et l'utilisation de l'oxygène comme une seule unité. De ce fait, la quantité maximale d'énergie consommée par unité de temps est représentée par la consommation maximale d'oxygène, indice qui prend en compte l'ensemble des facteurs qui agissent sur les deux composantes.

Ce système de transport et d'utilisation de l'oxygène peut être comparé à une chaîne dont le maillon le plus faible limite la résistance totale de la chaîne.

Les physiologistes de l'exercice se penchent depuis de nombreuses années sur cette question de *facteurs limitant* le $\dot{V}O_2$ max mais sans les avoir encore tous identifiés de façon certaine.

Il ne semble pas que ce soit le système respiratoire: celui-ci est apparemment *surdimensionné* (Åstrand, 1977), et l'entraînement provoque différentes adaptations ventilatoires, mais celles-ci n'influent pas d'une manière significative sur le $\dot{V}O_2$ max. Il ne semble pas non plus que ce soit le volume du cœur; les athlètes présentent, certes, un cœur légèrement plus gros que la normale, mais la différence observée avec les sédentaires n'explique pas les grandes différences de $\dot{V}O_2$ max que l'on constate entre athlètes et sédentaires. Il ne semble pas enfin que ce soit la concentration sanguine de globules rouges; l'entraînement modifie, en effet, très peu la concentration sanguine des globules rouges et d'hémoglobine.

Il se pourrait donc que les facteurs limitant le $\dot{V}O_2$ max se situent plutôt au niveau de la distribution de l'oxygène aux muscles en activité et surtout de son utilisation par les muscles (Nadeau et Péronnet, 1980).

Consommation d'oxygène post-exercice

La notion de *dette d'oxygène* est issue des travaux de Hill, Long et Lupton (1924). Elle a été ensuite développée par Margaria et al. (1933), qui soutenaient qu'au début de l'exercice, les processus aérobie ne suffisent pas à satisfaire les besoins énergétiques de l'organisme et sont suppléés par les réserves anaérobies en contractant un *déficit en oxygène*, qu'après l'exercice, la consommation d'oxygène demeure, un certain temps, au-dessus des valeurs de repos. Cette consommation d'oxygène en excès sert à payer le crédit en oxygène contracté au début de l'exercice (d'où l'appellation de dette d'oxygène).

La puissance aérobie est définie par l'aptitude à réaliser des efforts intenses et soutenus en utilisant des masses musculaires importantes. Certains auteurs (Åstrand, 1977, Åstrand et Rhyning, 1954) parlent de l'efficacité du système de transport de

l'oxygène et des processus énergétiques aérobie, d'autres (Lacour, Flandrois, et Denis, 1981, Wasserman et McIlroy, 1964) font aussi la distinction entre puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) et endurance aérobie (puissance de maintenir le plus longtemps possible un certain pourcentage du $\dot{V}O_2 \text{ max}$). En fait, le vocable de puissance aérobie englobe ces deux concepts distincts mais souvent confondus.

La puissance aérobie constitue un excellent indicateur de l'aptitude physique et des possibilités compétitives des sportifs, particulièrement pour les sports exigeant un effort intense et soutenu (McArdle et Katch, 1987; Thoden, Wilson et MacDougall, 1988). Ceci est lié, comme nous l'avons vu précédemment, au fait que pour ces activités sportives, le processus énergétique aérobie fournit la plus grande partie de l'énergie.

Le processus énergétique aérobie est conditionné par la puissance d'adaptation d'un ensemble de processus physiologiques, chargé de capter, de transporter, puis de livrer l'oxygène aux muscles actifs. L'indice représentatif de ce processus est la consommation maximale d'oxygène ou $\dot{V}O_2 \text{ max}$. Cet indice constitue une excellente source d'information sur la puissance du système de production d'énergie aérobie du fait que chaque litre d' O_2 consommé représente la libération d'environ 20 KJ (entre 19.7 et 21.2 KJ selon la valeur du quotient respiratoire).

Pour ces raisons essentielles, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude de la consommation maximale d'oxygène et des facteurs qui la sous-tendent et à son évaluation pour différents types de pratiques sportives.

La mesure de la consommation d'oxygène, chez un sujet pratiquant une activité sportive donnée, fournit des informations utiles sur le degré de sollicitation du

métabolisme aérobie lors de la pratique de ce sport et permet, par conséquent, de cerner les exigences énergétiques aérobies requises par ce sport.

Sur le terrain, la consommation d'oxygène n'est cependant pas facile à mesurer en raison des contraintes occasionnées à l'athlète par le port du dispositif de recueil des gaz respiratoires qui peut, dans la plupart des activités sportives, limiter ses mouvements et empêcher l'exécution naturelle de son activité sportive. Aussi la mesure de la consommation d'oxygène est presque exclusivement réalisée en laboratoire.

Par ailleurs, la connaissance de la relation $\dot{V}O_2$ max/performance, pour une discipline sportive donnée, permet de préciser le degré de participation des processus aérobies dans la réalisation de cette performance. Sur cette base, les techniciens du sport parviennent à une élaboration de programmes d'entraînement adaptés aux exigences énergétiques de la discipline sportive.

La détermination de l'importance relative de la puissance aérobie se heurte, cependant, à certaines difficultés, notamment celle de quantifier d'une manière rigoureuse la performance dans certaines disciplines sportives, tels les sports collectifs et les sports de combat. Pour ces sports, les auteurs tentent d'apprécier les exigences énergétiques aérobies à partir de la consommation maximale d'oxygène mesurée chez les meilleurs athlètes, dans une discipline donnée, et ils fournissent de bonnes indications sur le degré de sollicitation du système de transport et d'utilisation de l'oxygène.

Pour les disciplines sportives qui permettent une appréciation quantitative de la performance, telles que l'athlétisme, la natation et l'aviron, il est en revanche possible de préciser le degré de participation des processus aérobies à partir des relations qui existent entre la performance et la consommation maximale d'oxygène (Bergh et Bell, 1980;

Pollock, Jackson et Pate, 1980 , Ready, 1984; Sparling, 1984). Le $\dot{V}O_2$ max est généralement mesuré lors d'une épreuve maximale à charge progressivement croissante réalisée jusqu'à épuisement du sujet. L'inconvénient majeur des techniques classiques d'évaluation directe de la consommation maximale d'oxygène réside dans leur durée globale relativement importante, supérieure à 20 minutes, qui restreint son champ d'application.

Malgré leurs nombreux avantages, les techniques de mesure directe du $\dot{V}O_2$ max font appel à un appareillage coûteux, exigeant d'être manipulé par un personnel hautement qualifié. De plus, la nature de l'effort qu'elles demandent est peu compatible avec un état de santé fragile.

Dans le cas d'un programme d'évaluation d'adultes âgés de plus de 35 ans ou d'enfants de moins de 12 ans, et dans le cas de l'évaluation continue des athlètes, les mesures indirectes sous-maximales sont plus indiquées et généralement plus utilisées (Mac Dougall, Wenger et Green, 1980).

Les interrelations observées entre différentes variables physiologiques, que nous développerons plus loin, ont conduit de nombreux auteurs (Åstrand et Rhymin, 1954; Balke, 1960; Léger et Boucher, 1980; Margaria et al., 1965) à développer des techniques de laboratoire et de terrain, permettant d'évaluer d'une manière indirecte la dépense énergétique ou la puissance aérobie du sujet. Ces différents auteurs ont élaboré des équations permettant d'estimer la puissance aérobie du sujet à partir de la fréquence cardiaque pour une puissance de travail donnée, du principe de l'épreuve d'Åstrand et Rhymin (1954), de la puissance correspondant à une fréquence cardiaque donnée (principe de l'épreuve de PWC 170 de Karpman), ou à partir de la puissance maximale

développée lors d'une épreuve maximale à intensité progressivement croissante (épreuve de Balke, 1960).

Sur le terrain, les épreuves d'estimation du $\dot{V}O_2$ max reposent généralement sur les mêmes principes que celles réalisées en laboratoire. Elles comportent des épreuves en paliers, à vitesse progressivement croissante (Léger et Boucher, 1980; Léger et Mercier, 1983; Mercier et Léger, 1982), ou non progressives, c'est-à-dire constituées d'un seul palier à vitesse maximale dont la durée ou la distance varient selon les auteurs (Coleman, 1974; Cooper, 1969).

Par rapport aux techniques directes dont les mesures sont plus précises, mais qui nécessitent un matériel plus lourd et une qualification plus importante de la part de l'expérimentateur, les épreuves indirectes sont deux à cinq fois plus courtes, présentent une reproductibilité voisine des tests maximaux (Heyters, 1985) et une influence moindre de la collaboration et de la motivation du sujet. Quoiqu'accessibles et faciles à réaliser, les tests indirects sont sujets à erreur. L'écart entre le $\dot{V}O_2$ max mesuré et le $\dot{V}O_2$ max prédit peut atteindre 25% pour certains sujets (Bonen, Heyward, Cureton et Bosteau, 1979; Davies, 1968). Les sujets pour lesquels ces tests sont de prédiction insuffisante se retrouvent dans les catégories de $\dot{V}O_2$ max très basses ou très élevées.

Protocole de mesure du $\dot{V}O_2$ max (directe)

Plusieurs profils d'épreuves musculaires peuvent conduire à la mesure du $\dot{V}O_2$ max. Ils appartiennent généralement à l'une des trois catégories suivantes (Figure 2): (a) charge progressivement croissante discontinue, c'est-à-dire avec périodes de récupération intermédiaire, la durée de chaque palier étant de 3 à 6 minutes, (b) charge

progressivement croissante continue avec des paliers d'une durée de 1 à 3 minutes, sans interruption entre les paliers; et (c) charge constante.

Les tests à charge constante impliquent le choix d'une charge qui épuise le sujet après une période supérieure à 3 minutes mais inférieure à 6 minutes. Cependant, Belleville et Hellal (1980) ont démontré, chez les rameurs, qu'une période minimale de 60 secondes peut être suffisante pour mesurer le $\dot{V}O_2$ max, sous réserve d'un bon échauffement préalable. Ces épreuves à charge constante s'appuient sur des critères maximaux autres que le plafonnement du $\dot{V}O_2$ pour confirmer l'obtention du $\dot{V}O_2$ max. Une grande expérience ou un pré-test à charge progressive sont nécessaires pour déterminer la charge d'un test à palier constant. Bien que ce soit un test court et précis, il n'est pas recommandé pour une utilisation générale. En effet, l'aspect qualitatif des réactions physiologiques, c'est-à-dire l'évolution des paramètres physiologiques en fonction de la charge et leurs interrelations, échappent totalement à l'observation.

Les épreuves à charges progressives continues ou discontinues diffèrent principalement par la durée des paliers et par la façon d'augmenter la charge de travail. Dans le protocole discontinu, une période de repos d'une durée de 2 à 5 minutes est permise entre les charges. Chaque charge successive est plus élevée que la précédente et plusieurs charges sont utilisées jusqu'à ce que la dernière mène le sujet à son $\dot{V}O_2$ max. La durée de ce protocole est longue, mais permet la communication avec le sujet entre deux paliers et donne le temps d'effectuer les calculs de $\dot{V}O_2$ et d'autres paramètres lorsque l'on ne dispose pas d'un système d'analyse automatique.

Les tests progressifs continus ne sont pas interrompus par des périodes de récupération entre les paliers. Ils utilisent une augmentation plus légère de la puissance de

l'exercice d'un palier à l'autre. La durée des paliers est plus réduite à 1 à 3 minutes, et parfois à moins de 1 minute.

Différentes propositions de standardisation des épreuves ergométriques ont été définies par des instances internationales telles que l'Organisation Mondiale de la Santé (Lange, Andersen, Shephard, Denolin, Varnauskas et Masironi, 1971) et le *Working Group for Ergometry* de l'UNESCO (Information UNESCO, 1982). L'épreuve la plus répandue est celle de Petit (Petit, Delhez, Damoineau, Belge, Collee, et Deroanne, 1962), adaptée d'épreuves plus anciennes (Herbst, 1928 ; Taylor, Buskirk et Henschel, 1955).

Les principaux inconvénients de ces techniques résident d'une part, dans leur durée globale relativement importante, supérieure à 20 minutes, ce qui restreint leur champ d'application. Par ailleurs, compte tenu de l'accroissement important de la charge (en moyenne 50 watts) d'un palier au suivant, la puissance maximale aérobie exprimée en termes de puissance est imprécise car fournie à 15% près, particulièrement chez les sujets qui ne réussissent pas à réaliser entièrement le dernier palier.

Les valeurs de $\dot{V}O_2$ max déterminées par chacun de ces protocoles sont identiques pour un même individu (Belleville et Hellal, 1980; Thoden et al., 1988). L'obtention du $\dot{V}O_2$ max est assurée lorsqu'un plateau ou une légère baisse de $\dot{V}O_2$ survient malgré l'augmentation de la charge.

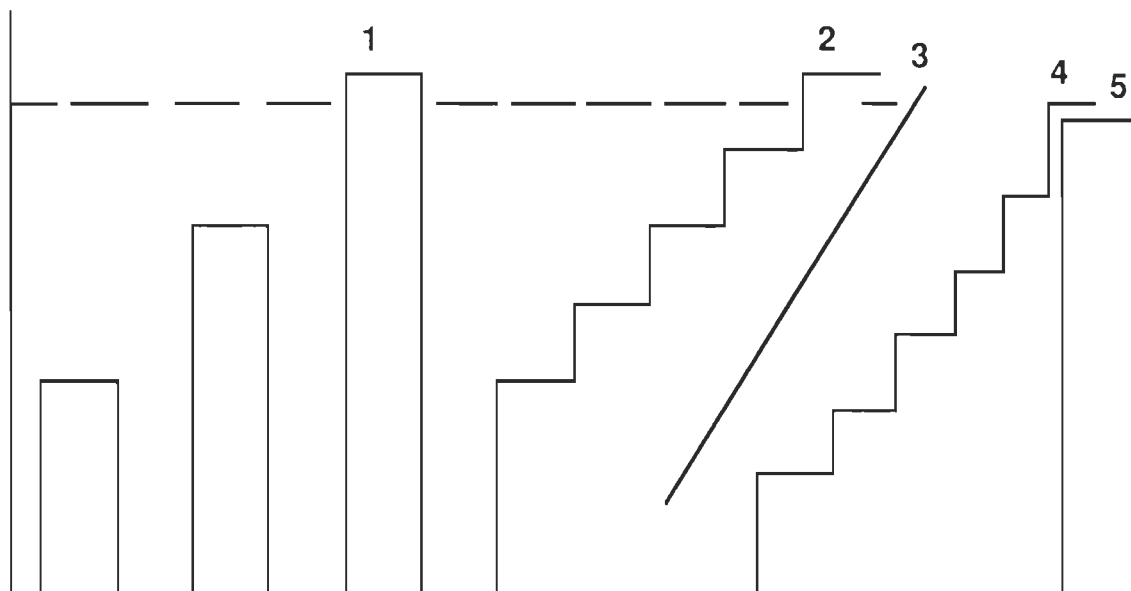


Figure 2. Catégorie de charges utilisées dans les épreuves d'effort *.

- 1 = épreuve à charge croissante discontinue, c'est-à-dire avec un temps de repos intermédiaire entre deux charges.
- 2, 3, 4 épreuves à charges croissantes continues, à palier de différentes durées:
- 2 = palier de 3 minutes et plus;
- 3 = paliers de quelques secondes;
- 4 = paliers de 1 minute à 2 minutes;
- 5 = épreuve à charge constante.

*schéma adapté de celui de l'Organisation Mondiale de la Santé, rapporté par Lange Andersen, Shephard, Denolin, Varnauskas, & Masironi, (1971).

Tests d'évaluation indirecte du $\dot{V}O_2$ max

Compte tenu des différents inconvénients liés à la mesure directe, de nombreux auteurs dont Åstrand et Rhyming (1954), Balke (1960) et Léger et Boucher (1980) ont développé des techniques permettant de mesurer d'une manière indirecte la puissance aérobie du sujet. Ces techniques présentent les principaux avantages suivants.

La durée du test est généralement plus courte que celle des tests de mesure directe; les tests sont relativement peu coûteux, l'équipement est simple, certains tests s'adaptent à des évaluations de groupe.

Les prédictions du $\dot{V}O_2$ max, à partir d'épreuves indirectes, sont généralement basées sur les interrelations existantes entre le $\dot{V}O_2$ max et d'autres variables plus aisément mesurables telles que la FC et la puissance de l'exercice.

Les épreuves destinées à l'estimation indirecte du $\dot{V}O_2$ max peuvent être subdivisées en épreuves maximales et épreuves sous-maximales. Toutefois ces épreuves possèdent, à des degrés divers, les mêmes sources d'imprécision:

-l'incertitude sur le coût énergétique individuel de l'exercice est la principale source d'erreur, la participation plus ou moins importante du métabolisme anaérobie est une deuxième source d'imprécision de la prédiction de $\dot{V}O_2$ max dans les tests réalisés un exercice maximal, l'incertitude sur la fréquence cardiaque maximale dans le cas des tests sous-maximaux, l'incertitude sur le caractère maximal de l'exercice chez des sujets peu motivés dans le cas des épreuves indirectes maximales.

Ces épreuves peuvent être maximales et présenter les limites et les risques d'administration, tels que ceux des épreuves directes. Dans ce cas, l'estimation du $\dot{V}O_2$ max se base essentiellement sur la relation établie entre le $\dot{V}O_2$ max et la puissance maximale supportée par le sujet (Tornvall, 1963).

Elles peuvent être sous-maximales et utilisent la relation qui existe entre $\dot{V}O_2$ max et FC pour une charge donnée, ou entre $\dot{V}O_2$ max et puissance pour une fréquence cardiaque donnée, ou utilisent l'extrapolation linéaire de $\dot{V}O_2$ max à partir de la relation $\dot{V}O_2$ -FC, jusqu'à la fréquence cardiaque maximale théorique. Chaque type d'épreuve est accompagné de l'équation établissant la liaison entre le $\dot{V}O_2$ max et la FC ou charge de travail, à défaut de l'existence d'un nomogramme de prédiction du $\dot{V}O_2$ max. Ces tests présentent l'avantage d'être faciles. Davies (1968), Maritz et al. (1961),

Rowell et al. (1964), Wyndham (1967) revoient la théorie et les suppositions sous-jacentes des tests sous-maximaux. Ceux-ci comportent des failles. L'erreur aléatoire de ces tests, de l'ordre de 10 à 20%, et même l'erreur systématique de certains tests, les rendent plus ou moins valides pour prédire le $\dot{V}O_2$ max d'un individu. Certains de ces tests (*Åstrand- Rhyming et Physitest*) présentent l'avantage d'offrir de nombreuses données normatives. Les épreuves suivantes de Ruffier, Schneider, Tuttle, Lian, Martin et Master, sont en général basées sur des paramètres de récupération après effort (fréquence cardiaque ou pression sanguine). Ces tests sont très peu valides et peu fidèles et ils sont désormais délaissés au profit des tests dynamiques.

La puissance aérobie peut être également appréciée à partir de la puissance correspondant à une fréquence cardiaque de 170 batt/min⁻¹ (Wahlund, 1948). En effet, l'adaptation d'un sujet à un effort sous-maximal est souvent évaluée par la recherche de la puissance de travail que peut effectuer un sujet lorsque sa fréquence cardiaque est égale à 170 batt/min⁻¹. Cette puissance est appelée *Physical Work Capacity* (PWC 170). La puissance développée pour une fréquence cardiaque égale à 170 batt/min⁻¹, peut être un témoin de la puissance aérobie d'un sujet (Crielaard et Pirnay, 1985), elle correspond à un pourcentage élevé de la PMA, laquelle varie selon l'âge, le sexe, le niveau et le type de pratique sportive (Åstrand et Rodahl, 1980).

Épreuves d'évaluation du $\dot{V}O_2$ max sur le terrain

L'inconvénient majeur des techniques de laboratoire est qu'elles se déroulent dans des conditions plus ou moins éloignées de la situation du terrain. De ce fait, les informations qui en découlent ont un intérêt pratique limité pour les entraîneurs et les athlètes. Elles peuvent poser en outre, des problèmes d'interprétation technique ou de communication avec les techniciens des laboratoires.

Le $\dot{V}O_2$ max peut être déterminé d'une manière indirecte sur le terrain, à partir de la vitesse de course d'une certaine durée ou d'une certaine distance (Coleman, 1974, Cooper, 1968). En effet, il est bien admis que la vitesse, dans les courses d'une durée supérieure à 3 minutes, est limitée en grande partie par le $\dot{V}O_2$ max. Plus le $\dot{V}O_2$ max du sujet est élevé, plus ses performances sur ces distances sont importantes et vice-versa (Davies et Thompson, 1979, Kenney et Hodgson, 1985, Pollock, Jackson et Pate, 1980, Coleman, 1974). Il est donc possible d'estimer le $\dot{V}O_2$ max sur le terrain à partir de la vitesse moyenne d'une course, à condition que la durée du parcours soit suffisamment grande pour permettre la mise en jeu effective des processus aérobie, et de disposer de l'équation ou du nomogramme appropriés permettant cette estimation.

Les épreuves d'évaluation du $\dot{V}O_2$ max sur le terrain présentent généralement les mêmes caractéristiques que celles réalisées au laboratoire. Elles peuvent comporter des paliers à vitesse progressivement croissante, comme c'est le cas des épreuves mises au point à l'Université de Montréal (Léger et Boucher, 1980, Léger et Mercier, 1983; Mercier et Léger, 1982), ou elles comportent un seul palier à la vitesse la plus élevée possible dont la durée ou la distance varient selon les auteurs, tel le cas de l'épreuve de Cooper (1968) et de celle de Coleman (1974).

L'inconvénient majeur des épreuves progressives de l'Université de Montréal réside dans le fait qu'elles requièrent une bande magnétique pré-enregistrée du protocole, laquelle sollicite l'usage d'un magnétophone puissant ou une sonorisation du stade dans lequel se déroule l'épreuve. La validité de la formule de prédiction a été vérifiée en comparant le $\dot{V}O_2$ max prédit avec le $\dot{V}O_2$ max mesuré sur tapis roulant. Dans l'étude originale (Léger, 1981), les valeurs moyennes des $\dot{V}O_2$ max prédits et mesurés étaient identiques. Dans d'autres études (par exemple Lacour, Montmayeur, Dormois, Gacon,

Padilla, et Viale, 1989), il existe une surestimation systématique. L'erreur-type de l'estimation était de $2.8 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, c'est-à-dire que 95% des sujets étaient estimés avec une erreur à $5.6 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ dans l'étude originale. Les épreuves continues, telles celles de Cooper (12 minutes) et de Coleman (9 minutes), autorisent une alternance marche-course; ceci entraîne une certaine imprécision dans l'estimation du coût énergétique de l'épreuve du fait que le rendement énergétique de la course est différent de celui de la marche (Bhambhani et Singh, 1985, Howley et Glover, 1974). D'autre part, compte tenu de leur durée relativement importante, les résultats risquent d'être influencés par des facteurs psychologiques, entre autres, chez les sujets peu motivés. Ces différents inconvénients ne sont pas en faveur d'une application massive de ces épreuves pour prédire la consommation maximale d'oxygène.

Épreuves triangulaires et rectangulaires

Les protocoles de mesure du $\dot{V}O_2$ max peuvent être subdivisés en protocoles triangulaires et rectangulaires (Taylor et al, 1955; Maksud et Coutts, 1971; McArdle et al., 1973; Fardy et Hellerskein, 1978). Dans les protocoles triangulaires, la puissance d'exercice croît par paliers de 1 à 4 minutes sans repos entre les différents paliers jusqu'à l'atteinte d'un plateau de $\dot{V}O_2$ ou jusqu'à l'épuisement du sujet. Le $\dot{V}O_2$ est mesuré en continu ou à la dernière minute des paliers. Dans les protocoles rectangulaires, les sujets réalisent une série d'exercices de 5 à 6 minutes. Des intervalles de récupération de 3 à 10 minutes séparent généralement les différents exercices mais, dans le cadre d'études expérimentales, cet intervalle peut dépasser la journée. La puissance des paliers croît de 20 à 25 watts sur ergocycle, sur tapis roulant soit que la vitesse est augmentée de 1 ou 2 km.h^{-1} , soit que la pente est accentuée de 2 ou 3%. Si le plateau de consommation d'oxygène semble plus net dans les protocoles rectangulaires, les différences de $\dot{V}O_2$ max

mesurés avec les protocoles rectangulaires et triangulaires sont peu importantes. Aussi, les épreuves triangulaires sont généralement utilisées pour des raisons de commodité.

Validité d'une épreuve de mesure indirecte du $\dot{V}O_2$ max

Un grand nombre d'études a été entrepris pour comparer différentes épreuves susceptibles de déterminer le $\dot{V}O_2$ max sur le terrain (Åstrand, 1952; Belleville, 1980, Petit et al, 1962, Vogelaere, 1983).

De ces travaux, il découle que, quel que soit le protocole utilisé, la durée et l'intensité de l'exercice ne semblent pas influencer significativement les valeurs de la consommation maximale d'oxygène, pourvu qu'une fatigue excessive soit évitée et qu'un échauffement préalable suffisant soit effectué. Notons, toutefois, que la fréquence cardiaque est plus élevée lorsque la durée de l'épreuve ergométrique est longue, même si la puissance mise en jeu est faible (Belleville, 1980; Thoden et al., 1988; Wasserman, 1981).

Pour pallier à ces inconvénients, nous avons élaboré une technique de mesure indirecte du $\dot{V}O_2$ max à accroissement progressif et continu de la charge. L'accroissement de la charge est conçu de manière à ce que la durée de l'épreuve se situe entre 8 et 9 minutes, soit deux à trois fois plus courte que l'épreuve classique. De plus, comme il y a une relation quasi linéaire entre la puissance, la charge et la fréquence cardiaque, (Åstrand, 1960), c'est par ce biais de la FC que la charge sera contrôlée, c'est-à-dire qu'on imposera au sujet de travailler, ici courir, à différents niveaux de sa fréquence cardiaque

Identification du problème

Au vu de cette variété de tests, on constate l'importance du coût des épreuves directes et du temps nécessaire à leur passation. Les épreuves indirectes gardent donc un intérêt certain et, parmi elles, il faut remarquer la validité généralement plus grande des protocoles d'efforts progressifs. C'est donc une épreuve indirecte de puissance aérobie par paliers progressifs de fréquence cardiaque, que nous tenterons de valider.

Objectif

L'objectif de notre étude est d'élaborer et de valider un test indirect progressif de puissance aérobie chez des sujets moyennement entraînés, en comparant nos résultats à une mesure directe prise sur tapis roulant.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

Nous abordons à présent la méthodologie mise en oeuvre pour rencontrer l'objectif de cette étude. Rappelons que nous proposons ici une procédure d'estimation de la puissance aérobie, validée par une mise en correspondance avec la mesure directe du $\dot{V}O_2$ max. La procédure proposée est une course sur piste d'athlétisme de 400 m, à différents paliers de fréquence cardiaque.

Nous présentons à tour de rôle l'échantillon des sujets, les instruments de mesure, le déroulement expérimental, les variables exploitées dans cette recherche, la méthode de traitement statistique et enfin certaines limites liées à cette étude.

Sujets

Au total 16 sujets, âgés de 19 à 28 ans, de sexe masculin, qui pratiquent régulièrement une activité sportive dans un centre de conditionnement physique, ont donné par écrit leur consentement pour participer à cette étude.

Instruments de mesure

Au laboratoire

Le test d'effort maximal servant de critère de validation s'effectuera sur un tapis roulant, en laboratoire, par méthode triangulaire. La mesure directe des échanges gazeux permettra d'obtenir, outre les variables mécaniques respiratoires, la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et le rejet de gaz carbonique ($\dot{V}CO_2$) avec détermination du quotient

respiratoire à la bouche (QRb), la fréquence cardiaque est enregistrée par télémétrie. La pression barométrique et la température ambiante sont relevées pour effectuer les conversions ATPS \longrightarrow BTPS et ATPS \longrightarrow STPD.

Sur le terrain

La fréquence cardiaque lors de la course sur circuit est contrôlée par télémétrie, tout au long du test, au moyen de l'appareil *Sport tester PE 3000* (*Polar Electro Oy* Finland, 1986), la précision de cet appareil (r de Galton) est de 0.98 selon Léger et al (1986). De plus, le circuit de course étant jalonné de repères aux 50 mètres, l'expérimentateur juge et note la distance courue, par chronométrage au 1/10 de seconde; la variable de vitesse sera dérivée de ces mesures.

Protocole expérimental

Protocole pour du $\dot{V}O_2$ max sur tapis roulant

Ce protocole d'évaluation constitue un test standardisé pour la mesure du $\dot{V}O_2$ max sur tapis roulant. Plusieurs auteurs (McArdle et al., 1973) reconnaissent cette méthode comme acceptable et la jugent fidèle ($r = 0.95$) et ce, à partir d'évaluations réalisés dans trois laboratoires. Voici les étapes de l'évaluation:

1. le but et les étapes du test sont expliqués au sujet;
2. les électrodes d'enregistrement du signal cardiaque sont placées sur le sujet; deux seront mises en bas de la cage thoracique, aux deux extrémités des côtes flottantes, tandis que la troisième sera placée dans la région de l'omoplate à gauche ou sur la partie supérieure du thorax au niveau du sternum;
3. la course sur le tapis roulant s'amorce à 4 km/h avec une pente de 0%. Cette vitesse initiale est graduellement haussée à la vitesse d'échauffement requise par

- le sujet lui-même, habituellement de 5 à 7 km/h. Cette étape est maintenue pour un minimum de 5 minutes ou jusqu'à ce que le sujet soit satisfait;
4. suit une période de récupération qui permet à la fréquence cardiaque de redescendre à moins de 120 batt/min⁻¹;
 5. le réglage de la vitesse de course utilisée lors du test est déterminée en fonction de la fréquence cardiaque développée à l'échauffement. Pour une fréquence cardiaque plus haute que 160 batt·min⁻¹, on prescrit une vitesse de 7.5 km/h, entre 140 et 160 batt·min⁻¹, une vitesse de 8 km/h, moins de 140 batt·min⁻¹, une vitesse de 8.5 km/h;
 6. un embout buccal est fixé au sujet pour recueillir les gaz respiratoires. Il commence à courir sur le tapis roulant, celui-ci ayant une pente de 0%;
 7. les quantités de gaz respirés s'impriment aux 30 secondes, pour chacune des charges de 2 minutes;
 8. l'angle du tapis roulant est augmenté de 2% à chaque 2 minutes¹;
 9. l'arrêt du test s'effectue à l'épuisement du sujet; la mesure finale est donc prise;
 10. le sujet doit être incité à se détendre en reprenant l'exercice mais plus modérément, à une pente de 0% et à une vitesse de 4 à 5 km/h, pour plusieurs minutes;
 11. une période de récupération est alors permise au sujet jusqu'à ce qu'il retrouve une fréquence cardiaque inférieure à 120 batt·min⁻¹;
 12. les calculs sont portés sur un graphique de façon à s'assurer qu'un maximum de la courbe du $\dot{V}O_2$ a été atteint, on désigne $\dot{V}O_2$ max la plus élevée des valeurs obtenues.

¹ L'unité d'angle de 1% signifie une élévation de 1 m pour 100 m de parcours, soit environ $\text{Sin-1}(0.01) = 0.574^\circ$ d'angle. Par exemple, $10\% \approx 5.740^\circ$.

Technique expérimentale d'estimation de la puissance aérobie

Les 16 sujets de sexe masculin, moyennement entraînés et adeptes d'un centre de santé et conditionnement physique (Centre DISPO de Trois-Rivières), âgés de 19 à 28 ans, ont participé à cette étude. Les sujets ont été examinés deux fois, dans un intervalle d'une semaine, en vue de vérifier la reproductibilité de la technique. Le test s'est déroulé sur piste plate étalonnée de 400 m. On a débuté avec un échauffement léger pendant 10 à 15 minutes avant la mise en place du cardiotachymètre. Le sujet effectue d'abord deux tours de piste à allure réduite, pendant lesquels les temps et la FC ne sont pas enregistrés. Ces deux tours sont demandés afin d'éviter des fluctuations trop importantes de la FC au début de l'effort.

Le test progressif maximal est constitué de 4 paliers de deux minutes chacun, selon une valeur cible relative de fréquence cardiaque (60, 70, 80, 90%), avec une tolérance de 5 battements en plus ou en moins; la valeur cible est en fait un pourcentage de la fréquence maximale théorique (Åstrand, 1960, Margaria et al., 1965, Maritz et al., 1961), soit $FC_{max} = 220 - \text{âge}$, l'âge donné en années. Après le quatrième palier, le sujet doit courir à la vitesse maximale afin d'atteindre aussi son maximum de fréquence cardiaque. À chaque tour de 400 m, on enregistre le temps de passage, tandis que la FC est contrôlée tout le long du parcours par télémétrie et notée au moment du passage. L'arrêt du test est décidé quand le sujet atteint un plateau de la FC; à cet instant, on note la distance exacte parcourue à l'aide des repères placés sur la piste. Par ailleurs on demande au sujet de courir le reste des 400 m, s'il le peut. L'ensemble des mesures de temps et de la FC permet d'établir un estimé de puissance aérobie, par relation avec la mesure directe du $\dot{V}O_2$ max.

Validité du système de mesure

Un test est valide lorsqu'il mesure bien ce qu'il est censé mesurer. En pratique, la plupart des tests mesurent quelques facteurs à la fois et, lorsqu'on se sert d'un de ces tests comme mesure d'un seul facteur, il faut que ce facteur, telle la puissance aérobie, y ait une influence prédominante afin que le test soit considéré valide. C'est ainsi qu'on parle volontiers d'un test qui est spécifique ou représentatif du facteur ou de la qualité mesurée.

Les indices de validité d'un test n'ont pas tous la même signification et la même objectivité. Cela n'est pas nécessaire non plus et dépend du rapport entre ce que le test mesure réellement et la qualité physique qu'on veut mesurer. Plus ce rapport est direct (au laboratoire), moins le test a besoin d'être validé.

Lorsque Cooper en 1968 valida son test de course de 12 minutes, il mit en corrélation la performance au test, soit la vitesse moyenne maintenue pendant 12 minutes, et le $\dot{V}O_2$ max déterminé directement sur tapis roulant. Il s'agissait d'une validation externe de ce test. La validation interne, ou fidélité, consiste à vérifier si les mêmes résultats seraient obtenus en reprenant l'étude une autre fois sur le même échantillon. La validation interne et externe du nouveau protocole est vérifiée ici sur un même échantillon de sujets ayant réalisé, dans les mêmes conditions expérimentales, les deux épreuves dans un intervalle de temps d'une semaine.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

Les données mesurées du test du terrain sont présentées en détail au Tableau 6 de l'Annexe A. Pour chaque sujet, on retrouve les distances parcourues ainsi que les distances finales avec leurs paramètres respectifs, à savoir le temps de passage et la fréquence cardiaque. Le Tableau 2 présente, pour chaque sujet, l'âge, le poids et la taille, de même que les mesures directes de la puissance aérobie, soit le $\dot{V}O_2$ max absolu et relatif et la (fréquence cardiaque maximale), observées lors de l'épreuve progressive maximale sur tapis roulant, en laboratoire.

Développement d'une variable prédictive

Par contraste avec le test de 12 minutes de Cooper (1968), le test de terrain étudié ici impose au sujet un *travail cardiaque* défini. Or, pour un travail cardiaque donné, il est légitime de penser que le travail effectif sera directement lié à la puissance aérobie. Comme tous les sujets devaient fournir un travail cardiaque approximativement équivalent, la distance totale courue devient un indice tout désigné du travail, et le rapport distance/temps, un indice de la puissance disponible. Le prédicteur de base sera donc ici la vitesse moyenne mesurée au test (VM), soit

$$VM = \frac{\text{distance parcourue totale}}{\text{durée totale de course}}$$

D'autres prédicteurs covariants peuvent être considérés, notamment la FC mesurée au sprint final, ou la FC max prédite selon l'âge, la taille, le poids, etc. Les corrélations

(r de Galton) établies entre les principales variables susceptibles d'avoir un impact sur la fonction de prédiction du $\dot{V}O_2$ max apparaissent au Tableau 3.

Ces variables sont la vitesse moyenne évaluée en pré-test (VMav) ou en post-test (VMap), les fréquences cardiaques les plus élevées aux deux occasions (FCav, FCap), l'âge, le poids, la taille et, bien sûr, le $\dot{V}O_2$ max servant de critère. On remarque la notable fidélité de la variable de vitesse moyenne [r (VMav, VMap) = 0.938], alors que pour la fréquence cardiaque, la fidélité pour ainsi dire nulle [r (FCav, FCap) = - 0.287] est sans doute attribuable au protocole employé, qui tendait à égaliser le travail cardiaque d'un sujet à l'autre, en réduisant ainsi la covariance.

Tableau 2

Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des sujets

Sujet	Age (ans)	Poids (kg)	Taille (cm)	$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)	$\dot{V}O_2$ (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
1	23	75	182	77.8	197
2	21	70	181	66.3	191
3	26	69	178	60.4	188
4	28	55	169	59.1	206
5	19	69	181	58.9	189
6	28	66	190	53.2	187
7	28	79	176	44.3	194
8	19	71	178	41.7	180
9	28	79	176	39.4	180
10	28	89	180	49.4	188
11	24	64	176	48.3	200
12	25	80	177	48.9	179
13	25	70	190	53.0	185
14	19	68	182	52.3	184
15	25	82	178	50.1	185
16	25	66	190	49.7	189
Moyenne	24.44	71	180.25	53.3	188.87
Écart-type	3.37	6.95	5.77	7.58	7.43

Tableau 3

Coefficients de corrélation (r de Galton*) pour quelques variables mesurées sur nos 16 sujets**

	Age	Taille	Poids	VMav	VMap	FCav	FCap
$\dot{V}O_2$ max	-0.228	0.123	-0.243	0.768	0.723	0.158	0.454
Age		-0.126	0.063	-0.206	-0.227	0.430	0.115
Taille			-0.027	-0.137	-0.103	0.032	-0.204
Poids				-0.361	-0.507	-0.080	-0.590
VMav					0.938	0.095	0.367
VMap						0.083	0.433
FCav							-0.287

*La formule du coefficient de corrélation linéaire, faussement attribuée à Karl Pearson, a été conçue et construite par Sir Francis Galton, un philanthrope anglais protecteur de Pearson (voir S.M. Stigler, *The History of Statistics*, Belknap Press, 1986).

**VMav et VMap constituent les estimés de "vitesse moyenne" au pré-test et au post-test respectivement alors que FCav et FCap sont les fréquences cardiaques obtenues en fin de course.

Tableau 4

Valeurs individuelles de vitesse moyenne en pré-test (VMav) et en post-test (VMap), de taille et de $\dot{V}O_2$ max, servant à établir la fonction prédictive du $\dot{V}O_2$ max

Sujet	VMav	VMap	Taille	$\dot{V}O_2$ max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
1	243.898	242.578	182	77.8
2	243.227	242.970	181	66.3
3	239.881	241.082	178	60.4
4	240.476	243.000	169	59.1
5	237.030	237.154	181	66.3
6	236.095	236.310	190	53.2
7	233.133	234.132	176	44.3
8	231.138	232.604	178	41.7
9	226.190	218.935	176	48.3
10	227.092	229.307	180	49.4
11	241.304	242.376	176	48.3
12	230.303	231.000	177	48.9
13	235.968	236.653	190	53.0
14	232.143	233.333	182	52.3
15	235.200	232.871	178	50.1
16	226.946	228.119	190	49.7
Moyenne	235.00	235.15	180.25	53.3
Écart-type	5.78	6.60	5.77	7.58

Dans le développement de l'équation de prédiction de la présente étude, le premier prédicteur retenu fut l'indice de puissance fourni par la vitesse moyenne. Par la suite, à partir des prédicteurs apparaissant au Tableau 3, la variable taille fut sélectionnée grâce à sa contribution supérieure en régression multiple.

Le Tableau 4 fait voir les données individuelles pour les variables prédictives retenues, ainsi que la valeur du $\dot{V}O_2$ max, obtenue en laboratoire.

Afin d'établir l'équation prédictive, nous avons eu recours à un doublement des données. En fait, nous avons fait comme si nous avions 32 sujets, au lieu de 16, en répétant les valeurs du $\dot{V}O_2$ max et de la taille, mais en leur associant tantôt la valeur de vitesse moyenne en pré-test, tantôt celle en post-test. Cette méthode a le double avantage de pallier au petit nombre de sujets et d'exploiter au maximum l'information présente dans nos données.

Après quelques tentatives, la fonction s'avérant la plus utile est:

$$\dot{V}O_2 \text{ max (Préd.)} = 2906.73 - 26.38 (VM) + 0.059 (VM)^2 + 0.4778 (\text{Taille})$$

Cette fonction incorpore une composante quadratique comme dans Léger et Boucher (1980). Dans notre cas cependant, cette composante est purement utilitaire et descriptive, elle indique que la $\dot{V}O_2$ max est en relation légèrement curvilinaire avec la vitesse de course et que la supériorité du puissance aérobie des sujets est plus que proportionnelle à leur vitesse moyenne. La taille, pour l'échantillon relativement homogène retrouvé ici (allant de 1.69 m à 1.90 m), ajoute une contribution positive et significative.

La Figure 3 montre la relation entre le $\dot{V}O_2$ max obtenu en laboratoire et les deux séries de mesures prédites (voir Tableau 5, Annexe A). On voit qu'il y a une bonne relation positive entre les mesures prises sur le terrain (post-test, pré-test) et la valeur de référence du $\dot{V}O_2$ max en abscisse

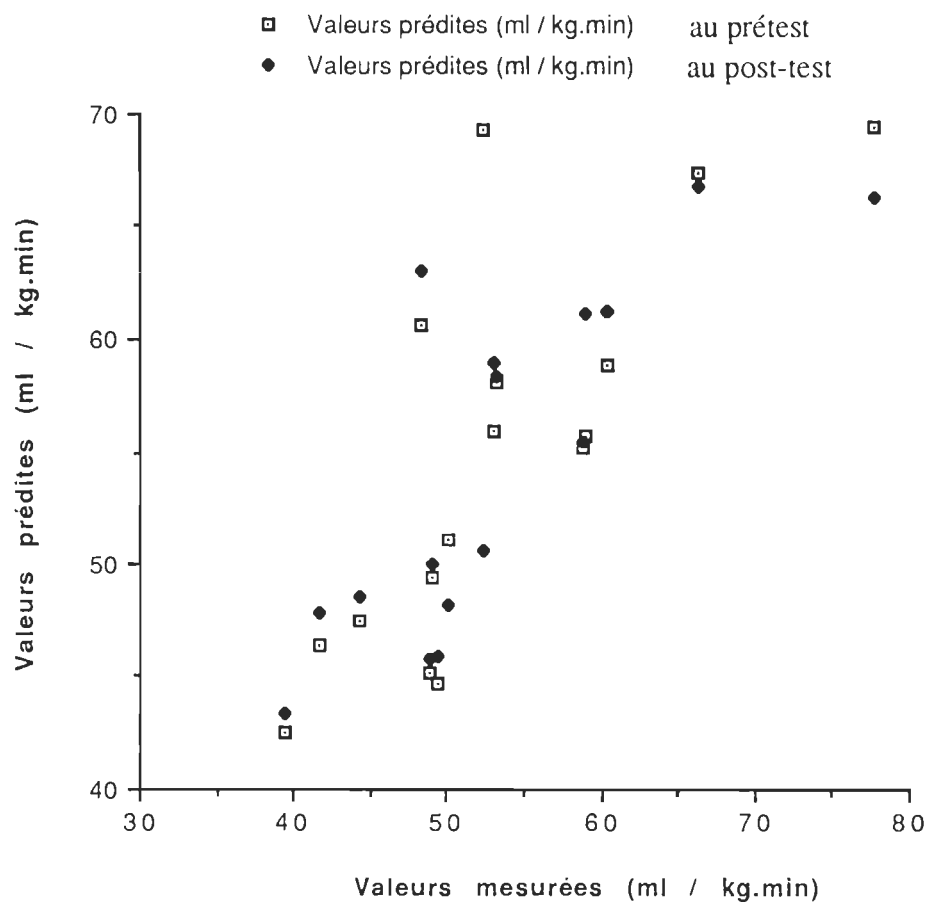


Figure 3. Relation entre le $\dot{V}O_2$ max prédit réalisé à deux reprises sur la piste de 400 m et le $\dot{V}O_2$ max mesuré sur le tapis-roulant.

La corrélation entre la prédiction au pré-test et la $\dot{V}O_2$ max est de 0.849 ($p < 0.01$), et elle est de 0.796 ($p < 0.01$) au post-test; quant à la fidélité de la prédiction nous obtenons $r(\text{Prédav Prédap}) = 0.969$.

Dans le contexte de notre modeste expérimentation, avec seulement 16 sujets, ces statistiques de validation nous semblent démontrer la faisabilité et l'intérêt d'un test prédictif de puissance aérobie basé sur le contrôle du régime cardiaque des sujets à l'effort.

DISCUSSION

Les auteurs consultés montrent que c'est l'épreuve en paliers qui réalise les conditions idéales pour atteindre la consommation d'oxygène la plus élevée. Cette épreuve présente en effet différents avantages, dont les principaux sont que l'intensité nécessaire à la mise en jeu de la totalité des processus aérobie n'est obtenue qu'après un échauffement progressif et que cette intensité n'est pas obligatoirement très importante. En outre, cette intensité n'est maintenue que pendant une courte période, d'une à deux minutes. Dans ces conditions, le $\dot{V}O_2$ max peut être déterminé sans épuisement préalable et sans production importante de lactate (Åstrand et Rodahl, 1980).

Si l'épreuve classique à paliers croissants réalise les conditions idéales pour obtenir un $\dot{V}O_2$ max, elle a un inconvénient majeur, sa longue durée (supérieure à 20 minutes), ce qui réduit son champ d'application. Compte tenu de sa longue durée, il est très fréquent qu'une fatigue musculaire locale apparaisse lors de ce type d'épreuves, entraînant l'interruption de l'épreuve avant que la consommation d'oxygène n'atteigne sa valeur maximale (Thoden et al., 1988).

Pour contourner ces inconvénients, nous avons élaboré un test de courte durée (8 à 9 minutes) basé sur une course à régime cardiaque progressif et contrôlé et servant à prédire la consommation maximale d'oxygène. Sa validité est évaluée par rapport au $\dot{V}O_2$ max mesuré d'une manière directe en laboratoire.

Le test progressif maximal en course à pied présente quatre points d'intérêt:

1. Par rapport au test de Cooper (1968), le sujet n'a pas besoin de connaître ou deviner sa vitesse de course optimale car le régime de course est imposé, à travers le contrôle de la fréquence cardiaque;

2. L'exercice n'est probablement difficile psychologiquement que dans les dernières minutes précédant l'épuisement;
3. La durée du test est moins longue que celle du test similaire proposé par Léger et Boucher (1980);
4. Cette épreuve permettrait de connaître la *vitesse moyenne aérobie* (vitesse moyenne jusqu'à l'atteinte du $\dot{V}O_2$ max) et serait un repère plus immédiat pour la connaissance du $\dot{V}O_2$ max.

Les résultats analysés à propos de notre test de course à régime cardiaque progressif sont encourageants. Bien sûr, la fidélité du prédicteur principal, la vitesse moyenne de course (VM), n'est pas parfaite. Cependant rappelons qu'au test de 12 minutes de Cooper, basé en fait sur une vitesse moyenne sans contrôle cardiaque, la fidélité rapportée dans la littérature est de 0.826 (Cooper, 1968), alors que chez nos sujets, la fidélité du test-retest de l'indice VM est 0.938. Cet avantage de notre indice VM sur celui de Cooper est attribuable à coup sûr au contrôle du régime cardiaque. Dans notre test, nous nous assurons que les sujets effectuent leur course après un sérieux échauffement, et qu'ils réalisent cette course de manière soutenue, sous la contrôle de leur fréquence cardiaque. Cette procédure fait que les étapes de mesure des sujets sont relativement homogènes et réduit donc l'erreur de mesure, d'où la fidélité test-retest plus élevée.

Il ne fait aucun doute que dans l'étude présente, l'échantillonnage limite grandement la portée des résultats. Tout d'abord, l'échantillon est très restreint, les sujets sont tous de jeunes mâles et sont moyennement entraînés. Nous pensons qu'il serait intéressant de reprendre l'étude avec un échantillon de sujets plus diversifié en sexes, en âges et en niveaux d'entraînement. Les bons résultats issus d'un protocole à régime cardiaque

contrôlé laissent présager qu'il serait possible d'établir une fonction prédictive de la puissance aérobie aussi bonne et plus généralisable que dans les présentes conditions.

CONCLUSION

L'intérêt porté à la mesure de la puissance aérobie résulte, entre autres, de son influence sur la réalisation de la performance dans les disciplines qui requièrent un haut niveau de dépense énergétique, de son utilité pour de nombreuses autres disciplines et de sa relation avec la condition physique. Cet intérêt est également lié au fait que la consommation d'oxygène constitue la première mesure de la dépense énergétique que l'on ait su calculer et interpréter.

Selon les objectifs envisagés, selon le niveau et le type de pratique sportive et, enfin, le matériel disponible, les techniques utilisées pour la mesure du $\dot{V}O_2$ max varient, aussi bien par leur forme et leur intensité que par leur durée.

La mesure peut être directe ou indirecte, maximale ou sous-maximale, réalisée au laboratoire ou sur le terrain. Nous avons revu ici quelques techniques parmi les plus importantes proposées dans la littérature. De plus, une technique de prédiction du $\dot{V}O_2$ max est mise au point et validée dans cette étude, basée sur une course en circuit. L'originalité de la technique tient au fait que c'est le régime cardiaque du coureur, non pas la vitesse ou la distance, qui est contrôlée par la procédure. Il s'agit d'un effort maximal à paliers progressifs de fréquence cardiaque, où les paliers correspondent à des fractions croissantes de la fréquence maximale estimée de chaque coureur.

Les résultats d'expérience, issus d'un échantillon plutôt homogène de 16 jeunes adultes mâles, montrent la faisabilité et l'intérêt d'un protocole d'estimation de la puissance aérobie à partir du contrôle de la fréquence cardiaque. La fonction prédictive, une régression multiple avec des composantes du premier et deuxième degrés de la vitesse

moyenne de course et une composante de taille, a des similitudes avec celle de Léger et Boucher (1980), elle-même basée plutôt sur le contrôle de vitesse de course.

Il faudra, bien sûr une expérimentation à plus grande échelle impliquant des échantillons plus diversifiés et une technique d'estimation statistique assise sur de plus nombreux résultats; un jugement sur le mérite métrologique du test proposé ne saurait être formé qu'à ces conditions.

Nous croyons néanmoins avoir indiqué une piste nouvelle, celle de l'effort contrôlé via les paliers de fréquence cardiaque, et avoir présenté des résultats qui confirment les avantages anticipés dans cette piste.

Références

- Åstrand, P.O. (1952). *Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age*. Copenhagen: Ejnar Munksgaard.
- Åstrand, P.O. (1960). Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol. Scand.*, 49, 7-88.
- Åstrand, P.O., & Rhyning, I. (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity pulse rate during sub-maximal work. *J.Appl.Physiol.*, 7, 218-221.
- Åstrand, P. O. & Rodahl, K. (1980). *Précis de physiologie de l'exercice musculaire*. Paris: Masson.
- Balke, B. (1960). *Biodynamics: Human. In medical physics*. Chicago: Glasser, Yearbook.
- Belleville, J., & Hellal, H. (1980). Comparaison de 3 épreuves de détermination de $\dot{V}O_2$ max. *Méd. Sport.*, 54, 227-231.
- Bergh, U. (1978). *Étude physiologique du ski de fond*. (Traduit du suédois par M. Robin, J. R. Lacour, éd.)
- Bergh, K., & Bell, W. (1980). Physiological and anthropometric determinants of mile run time. *J. Sp. Med.*, 20, 390-396.
- Bhambhani, Y., & Sigh, M. (1985). Metabolic and cinematographic analysis of walking and running in men and women. *Med. Sci. in Sp.*, 1, 131-137.
- Bonen, A., Heyward, V. H., Cureton, K. J., & Bosteau, R. A. (1979). Prediction of maximal oxygen uptake in boy, ages 7-15 years. *Med. Sci. Sp.*, 11, 24-29.
- Bouchard, C. (1988). Genetic-basis of racial differences. *Can. J. Spt. Sci.*, 13(2), 104-108
- Brooks, G. A. & Fahey, T. D. (1984). *Exercise physiology. Human bioenergetics and its applications*. New-York: Wiley & Sons.

- Bye, R. T. P. (1984). Ventilatory muscles during exercise in air and oxygen in normal men. *J. Appl. Physiol.*, 56, 464.
- Coleman, A. E. (1974). Validity of distance runs with elementary school children Norfolk. *AAHPER*.
- Cooper, K.H. (1968). A mean of assessing maximal oxygen intake. *J. Am. Med. Ass.*, 203, 201-204.
- Crielard, J. M., & Pirnay, F. (1985). Étude longitudinale des puissances aérobie et anaérobie alactique. *Méd. Sport.* 59, 4-6.
- Davies, C.T.M., & Thompson, M.W. (1979). Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athlete. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 41, 233-245.
- Davies, C. T. M. (1968). Limitations to the predicting of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Appl. Physiol.*, 24, 700-706.
- Fardy, P. S., & Hellerskein, H. K. (1978). A comparaison of continuous and intermittent progressive multistage exercise testing. *Med. Sci. Sports.*, 10, 7-12.
- Folinsbee, L. J. (1983). Exercise respiratory pattern in elite cyclists and sedentary subjects. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 15, 503.
- Fox, E. L., & Mathews, D. K. (1984). *Bases physiologiques de l'activité physique*. Paris: Vigot.
- Grimby, G. (1969). Respiration and exercise. *Med. Sci. Sp.*, 1, 9.
- Herbst, R. (1928). *Dtsch. Arch. Klin. Med.*, 162, 33.
- Heyters, C. (1985). Valeurs normales de la puissance de travail pour une FC de 170 batt.min⁻¹. *Méd. Sport.*, 59, 38-44.
- Hill, A. V., Long, C. N. H. & Lupton, H. (1924). Muscular exercise, Lactic acid and the supply and utilisation of O₂. (Pt. I-III). *Proc. Roy. Soc. B.*, 96, 438-475.

- Howley, E. T., & Glover, M. E. (1974). The caloric costs of running and walking on mile for men and women. *Med. Sci. Sp.*, 6(4), 235-237.
- Information UNESCO. (1982). Working group for ergometry ICSPE. Conditions conseillées pour mesurer la puissance de performance physique lors d'examens ergométriques. *Méd. Sport.*, 56, 132.
- Kenney, W. L., & Hodgson, J. L. (1985). Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *Brit. J. Sp. Med.*, 19(4), 207-209.
- Lacour, J. R., Montmayeur, A., Dormois, D., Gacon, G., Padilla, S., & Viale, C. (1989). Validation de l'épreuve de mesure de la vitesse maximale aérobie (VMA) dans un groupe de coureurs de haut niveau. *Science et Motricité*, 7, 3-8.
- Lacour, J.R., Flandrois, R., & Denis, C. (1981). Les tests d'effort. In *Sports & Sciences*. Paris: Vigot.
- Lange Andersen, K., Shephard, R. J., Denolin, H., Varnauskas, E., & Masironi, R. (1971). *Les épreuves d'effort: Principe fondamentaux*. Genève: OMS.
- Léger, L. (1981). Test progressif de course. Navette de 20 m de léger. Tests d'évaluation de la condition physique de l'adulte. Capacité Aérobie. *Ministère du loisir, de la chasse et de la pêche, comité Kino-Québec*. (Fascicule B-6).
- Léger, L., & Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test. Université de Montréal Track Test. *Can. J. Appl. Sp. Sci.*, 5, 77-84.
- Léger, L., & Mercier, D. (1983). Coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste. *Motrice Humaine.*, 2, 66-69.
- Lian, C. (1916). Épreuve d'aptitude cardiaque à l'effort. *Presse Médicale*, 68, 563-564.
- Mc Ardle, W. D. & Katch, V. (1987). *Physiologie de l'activité physique: énergie, nutrition et performance*. (2e éd.). Paris: Vigot & Edismen.

- Mac Dougall, J. D., Wenger, H. A., & Green, H. J. (1980). *Évaluation physiologique de l'athlète de haut niveau*. Paris: Vigot.
- Mahler, D. A. (1982). Ventilatory responses at rest and during exercise in marathon runners. *J. Appl. Physiol.*, 52, 388.
- Maksud, M. & Coutts, K. (1971). Comparaison of continuous and discontinuous graded treadmill test for maximal oxygen uptake. *Med. Sci. Sports*, 3, 63-65.
- Margaria, R., Aghemo, P., & Rovelli, E. (1965). Indirect determination of maximum oxygen consumption in man. *J. Appl. Physiol.*, 20, 1070-1073.
- Margaria, R., Edwards, H. T., & Dill, D. B. (1933). The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactate acid in muscular contraction. *Am. J. Physiol.*, 106, 689-714.
- Maritz, J. S., Morrisson, J. F., Peter, J., Strydom, N. B. & Wyndham, C. H. (1961). A practical method of estimating and individual's maximal oxygen intake. *Ergonomics*, 4, 97-122.
- Martin, B. J. (1984). Anaerobic metabolism in the respiratory muscles during exercise. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 16, 82.
- Martinet, A. (1916). Épreuve fonctionnelle circulatoire. Appréciation de la puissance de réserve du coeur. *Presse Médicale*, 4, 27-29.
- Master, A., & Oppenheimer, E. T. (1929). A simple exercise tolerance test for circulatory efficiency with standard tables for individuals. *Am. J. Med. Sci.*, 177, 223-243.
- Matveiev, L. P. (1983). *Aspects fondamentaux de l'entraînement*. Paris: Vigot.
- Mercier, D., & Léger, L. (1982). L'évaluation de la puissance aérobie maximale du coureur. *Track Field J.* 13, 15-18.

- Moore, R. L., & Gollnick, P. D. (1982). Response of ventilatory muscles of the rat to endurance training. *Pfugers Arch.*, 392, 268.
- Murray, T. D., Zinkgraf, S. A. & Shea, C. (1980). The relationship of selected training variables on performance in marathon running. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 12(81).
- Nadeau, M., & Péronnet, F. (1980). *Physiologie de l'activité physique*. Paris: Vigot.
- Novack, L. P., Woodward, W. A., Bestit, C. & Mellerowicz, H. (1977). Working capacity, body composition, and anthropometry of olympic female athletes. *J. Sp. Med. and Phys. Fitn.*, 17, 275-283.
- Petit, J. M., Delhez, L., Damoineau, J., Belge, G., Collee, G., & Deroanne, R. (1962). *Comm. Congres Int. Ed. Phys.* Liège.
- Pirnay, F., & Criellaard, J. M. (1979). Mesure de la puissance anaérobie alactique. *Méd. Sport.*, 53, 13-16.
- Pollock, M. L., Jackson, A. S., & Pate, R. R. (1980). Discriminant analysis of physiological differences between good and elite distance runners. *Res. Quart.*, 3, 521-532.
- Ready, A. E. (1984). Physiological characteristics of male and female middle distance runners. *Can. J. Appl. Sp. Sci.*, 2, 700-707.
- Robinson, E. P. & Kjeldgaard, J. M. (1982). Improvement in ventilatory muscle function with running. *J. Appl. Physiol.*, 52, 1400.
- Rowell, L. B., Taylor, H. L. & Wang, Y. (1964). Limitations to prediction of maximal oxygen intake. *J. Appl. Physiol.*, 19, 919-927.
- Ruffier, J. E. (1955). L'indice de résistance du coeur. *Med. Educ. Phys. Sport*, 29, 38-41.
- Sady, S. (1984). Physiological characteristics of high-ability prepubescent wrestlers. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 16, 72.

- Saltin, B., Henriksson, J., Nygaard, E., Andersen, P., & Jansson, E. (1977). Fibre types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Annals of the New York Acad. Sci.*, 3, 301.
- Scheider, E.C. (1920). A cardiovascular rating a measure of physical fating and efficiency. *J. Am. Med. Ass.*, 74, 1507.
- Slovic, P. (1977). Empirical study of training and performance on the marathon. *Rest. Quat.*, 48, 769-777.
- Sparling, P.B. (1984). Physiological determinants of distance running performance. *The Physician and Sport. Medicine.*, 2, 68-77.
- Stigler, S.M. (1988). *The history of statistics*. The Belknap Press.
- Taylor, H.L., Buskuik, E., & Henschel, A. (1955). A maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J. Appl. Physiol.*, 8, 73-80.
- Thoden, J. S., Wilson, B. A., & Mac Dougall, J. D. (1988). Évaluation de la puissance aérobie. In *Évaluation physiologique de l'athlète de haut niveau*. Paris: Ed. Décarie Vigot.
- Tornvall, G. (1963). Assessment of physical capabilities. *Acta Physiol. Scand.*, 58, 102.
- Tuttle, W. W. (1931). The use of the pulse-ratio test for rating physical efficiency. *Res. Quat*, 2, 5-17.
- Vandewalle, H., Peres, G., & Monod, H. (1987). Standard anaerobic exercises tests. *Sport Medicine*, 4, 268-289.
- Vogelaere, P., & S'Jongers, J. J. (1983). Consommation maximale d'oxygène et techniques de mesure. *Méd. sport.*, 57, 16-19.
- Wahlund, H. (1948). Determination of the physical working capacity. *Acta. Med. Scand.*, 215, 76-78.

- Wasserman, K., Whipp, B. J. & Davis, J. A. (1981). Respiratory physiology of exercise: metabolism, gas exchange and ventilatory control. In *Respiratory Physiology III, Int. Rev. Physiol. Ser.*, 23, 149-211.
- Wasserman, K., & Mac Ilory, M. B. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism. *Am. J. Cardiol.*, 14, 844-852.
- Weineck, J. (1983). *Manuel d'entraînement*. Paris: Vigot.
- Wyndham, C. H., Strydom, N. B., & Van Rensburg, A. J. (1969). Physiological requirements for worlds-class performances in endurance running. *S. Afr. Med. J.*, 43, 996-1002.

Annexe A

Tableau 5

La puissance aérobie étudiée par la mesure du $\dot{V}O_2$ max à deux reprises, à intervalle d'une semaine

Sujet	Test Valeurs prédites (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	Retest Valeurs prédites (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	Valeurs mesurées (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
1	69.35	66.28	77.80
2	67.29	66.69	66.30
3	58.75	61.15	60.40
4	55.62	61.03	59.10
5	55.17	55.37	58.90
6	58.04	58.36	53.20
7	47.48	48.57	44.30
8	46.42	47.86	41.70
9	42.48	43.34	39.40
10	44.72	45.94	49.40
11	60.65	62.97	48.30
12	45.24	45.82	48.90
13	55.85	58.88	53.00
14	49.29	50.58	52.30
15	51.03	48.15	50.10
16	49.44	49.99	49.70
moy	53.67	54.44	53.3
é-t	7.99	7.78	7.58

Tableau 6.

Données mesurées au test du terrain, en distances parcourues et distances finales avec leurs paramètres respectifs, à savoir le temps du passage et la fréquence cardiaque, en prétest et en post-test (suite).

1	400	2:03	120	800	3:55	140	1200	5:31	162	1600	6:48	179	1870	8:00	180	2070	8:32	194
2	400	2:01	121	800	3:57	141	1200	5:30	162	1600	6:50	180	1875	8:00	181	2045	8:25	193
3	400	2:02	119	800	3:50	137	1200	5:31	159	1600	7:08	176	1862	8:00	179	2005	8:19	185
4	400	2:07	121	800	3:56	139	1200	5:43	163	1600	7:23	175	1850	8:00	183	2025	8:20	201
5	400	1:59	119	800	3:51	142	1200	5:34	161	1600	7:09	164	1860	8:00	174	2000	8:26	184
6	400	2:05	119	800	4:00	135	1200	5:48	154	1600	7:27	176	1830	8:00	179	1985	8:24	190
7	400	2:07	120	800	3:56	134	1200	5:43	157	1600	7:28	161	1850	8:00	176	1955	8:21	186
8	400	2:08	124	800	4:00	144	1200	5:48	144	1600	7:32	162	1835	8:00	176	1950	8:23	188
9	400	2:11	122	800	4:11	141	1200	6:03	157	1600	7:41	162	1660	8:00	171	1850	8:27	185
10	400	2:10	122	800	4:03	133	1200	5:53	142	1600	7:35	158	1810	8:00	172	1930	8:25	188
11	400	2:00	120	800	3:50	135	1200	5:31	154	1600	7:01	158	1850	8:00	175	2040	8:25	189
12	400	2:05	122	800	3:55	132	1200	5:40	155	1600	7:17	157	1860	8:00	174	1925	8:20	189
13	400	2:01	116	800	3:51	132	1200	5:32	150	1600	7:08	155	1845	8:00	174	1980	8:22	185
14	400	2:06	123	800	3:55	143	1200	5:42	159	1600	7:18	164	1825	8:00	179	1960	8:24	188
15	400	1:59	121	800	3:47	138	1200	5:30	159	1600	7:02	160	1830	8:00	172	1960	8:25	185
16	400	2:06	120	800	3:58	134	1200	5:47	155	1600	7:26	158	1810	8:00	174	1920	8:25	192

Tableau 6.

Données mesurées au test du terrain, en distances parcourues et distances finales avec leurs paramètres respectifs, à savoir le temps du passage et la fréquence cardiaque, en prétest et en post-test.

Sujet	Distance	Temps	FC	Distance	Temps	FC	Distance	Temps	FC	Distance	Temps	FC	Distance	Temps	FC	Distance	Temps	FC
1	400	2:02	121	800	3:57	142	1200	5:30	160	1600	6:50	180	1865	8:00	181	2065	8:28	191
2	400	2:03	123	800	3:59	143	1200	5:33	164	1600	6:52	183	1870	8:00	184	2035	8:22	189
3	400	2:05	120	800	3:55	139	1200	5:34	157	1600	7:00	173	1865	8:00	177	2015	8:24	183
4	400	2:09	123	800	3:57	141	1200	5:47	160	1600	7:29	180	1845	8:00	184	2020	8:24	195
5	400	2:01	122	800	3:50	143	1200	5:31	158	1600	7:06	163	1860	8:00	178	1995	8:25	188
6	400	2:04	121	800	3:56	133	1200	5:41	155	1600	7:22	174	1825	8:00	176	1995	8:27	189
7	400	2:08	121	800	3:58	137	1200	5:47	154	1600	7:31	160	1830	8:00	173	1935	8:18	189
8	400	2:09	123	800	4:02	142	1200	5:52	145	1600	7:36	164	1825	8:00	177	1930	8:21	186
9	400	2:10	118	800	4:06	139	1200	5:56	155	1600	7:39	160	1720	8:00	174	1900	8:24	187
10	400	2:11	121	800	4:06	132	1200	5:55	140	1600	7:38	155	1800	8:00	175	1900	8:22	189
11	400	1:59	119	800	3:47	134	1200	5:27	152	1600	6:59	158	1845	8:00	173	2035	8:26	191
12	400	2:01	120	800	3:54	130	1200	5:42	152	1600	7:20	154	1850	8:00	172	1900	8:15	187
13	400	2:03	119	800	3:53	130	1200	5:36	152	1600	7:14	160	1830	8:00	171	1990	8:26	182
14	400	2:06	121	800	3:54	139	1200	5:39	156	1600	7:20	162	1800	8:00	176	1950	8:24	189
15	400	2:00	119	800	3:48	135	1200	5:28	157	1600	7:01	159	1835	8:00	170	1960	8:20	186
16	400	2:08	118	800	4:02	131	1200	5:50	153	1600	7:29	156	1795	8:00	171	1895	8:21	189

Annexe B

Consentement en connaissance de cause à l'épreuve d'effort progressif pour des fins expérimentales pour les sujets participants

1. Explication de l'épreuve d'effort progressif

Vous allez effectuer une épreuve d'effort progressif sur tapis roulant. Les charges initiales de travail seront faibles et vous pourrez facilement accomplir l'exercice, elles seront augmentées par la suite en fonction de votre puissance au travail. Nous pouvons arrêter l'épreuve dans le cas où vous manifestez des signes de fatigue ou vous pouvez y mettre fin vous-même si vous ressentez de la fatigue ou que vous ne sentez pas à l'aise. Nous ne voulons pas que vous fournissiez des efforts trop intenses que vous auriez du mal à supporter.

Ensuite, quelques jours après, vous effectuerez une épreuve de course sur piste. Au début, la vitesse imposée est lente, puis elle sera élevée à toutes les deux minutes pour une durée de huit minutes. Nous arrêterons l'épreuve si vous manifestez des signes de fatigue ou autres. Ce test a pour but de prédire la consommation d'oxygène à partir des résultats recueillis au laboratoire.

2. Risques et efforts difficiles à supporter

Il est possible que des incidents surviennent au cours de l'épreuve. Parmi ces incidents, citons: une tension artérielle devenant anormale, un évanouissement, un rythme cardiaque désordonné, très rarement une attaque cardiaque. Toutes les précautions seront prises pour que ces risques soient réduits au minimum et des observations seront faites durant l'épreuve.

3. Avantage

Les résultats obtenus à l'épreuve d'effort peuvent faciliter un diagnostic ou la détermination de la nature des activités dans lesquelles vous pouvez vous engager sans risques, pratiquement.

4. Questions

Nous serions heureux de répondre aux questions touchant les procédures utilisées durant l'épreuve d'effort ou lors de l'estimation de la puissance fonctionnelle que vous pourriez vous poser. N'hésitez pas à demander des explications supplémentaires si vous avez le moindre doute.

5. Consentement en toute liberté

Vous êtes entièrement libre de nous autoriser à vous faire subir les deux épreuves d'effort progressif, au laboratoire et sur le terrain ou, au contraire, de refuser de passer cette épreuve.

J'ai pris connaissance de cette formule, je comprends les procédures de l'épreuve que je vais subir et je consens à participer à l'épreuve.

Signature du sujet

Témoin

Date